



**André Gonçalves Águas**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

## **Otimização de um sistema online de detecção de falhas em motores de indução**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins,  
Prof. Auxiliar, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Rui Dias Jorge, Mestre, EFACEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina

Arguente: Prof. Doutor Vitor Manuel de Carvalho  
Fernão Pires

Vogais: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins  
Mestre Rui Dias Jorge



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2013**





**André Gonçalves Águas**

BSc in Electrical and Computer Engineering

## **Optimization of an online system for faults detection in induction motors**

Dissertation to obtain the degree of Master in Electrical and Computer Engineering

Supervisor: Prof. João Francisco Alves Martins, PhD,  
Science and Technology Faculty from  
Universidade Nova de Lisboa

Co-supervisor: Rui Dias Jorge, MSc, EFACEC

Evaluation Board:

President: Prof. João Miguel Murta Pina, PhD

Opponent: Prof. Vítor Manuel de Carvalho Fernão  
Pires, PhD

Members: Prof. João Francisco Alves Martins, PhD  
Rui Dias Jorge, MSc



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**September 2013**





## **Copyright**

### **Otimização de um sistema online de deteção de falhas em motores de indução**

Copyright © André Gonçalves Águas, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Aproveito este espaço para deixar os meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram para que este trabalho fosse concretizado.

Ao professor João Martins pela sua disponibilidade, recomendações, apoio, e pela forma como orientou o meu trabalho. Gostaria de agradecer também ao Eng.º Rui Dias Jorge pela ajuda e disponibilidade demonstrada, e ao Eng.º Luís Filipe Mendes, pela ajuda na ambientação à TPU e na implementação do sistema.

Ao Eng.º David Inácio pela ajuda e disponibilidade para resolver os problemas encontrados na componente prática.

Aos meus colegas, Gonçalo Carrasco, João Cruz e ao Rui Evaristo pela ajuda e motivação ao longo de todo este percurso mas principalmente pela amizade e momentos vividos neste período. Ao Eng.º Miguel Marques, que de certa forma me integrou no tema da dissertação e esteve sempre disponível para solucionar qualquer tipo de problema.

Não ficando esquecidos, agradeço também aos colegas que de certa forma contribuíram para o meu sucesso académico.

Agradeço à minha família que sempre me apoiou e incentivou, particularmente ao meu pai, pela ajuda e partilha de conhecimentos científicos. Á Inês por toda a paciência demonstrada e pelo forte apoio sentido, principalmente na fase final deste trabalho.



## Resumo

Os motores de indução, por razões técnicas e económicas, são utilizados em larga escala na indústria. Embora considerado extremamente fiável, este motor, tal como qualquer outro, é suscetível a vários tipos de falhas.

Desempenhando funções cruciais no processo de produção industrial, a sua avaria reflete-se em pesados prejuízos económicos. Neste sentido têm vindo a ser adotadas novas estratégias de manutenção preditiva, mas as soluções oferecidas pelo mercado apresentam custos consideráveis pois baseiam-se em múltiplos sensores, obrigando, por vezes, à inspeção do motor em bancada, requerendo ainda, a intervenção de um técnico para avaliar os dados e concluir da condição do motor.

O sistema desenvolvido no âmbito da dissertação procura detetar e diagnosticar falha(s) de forma autónoma e em tempo real, através de uma análise estatística (PCA) e espectral. Necessitando apenas das correntes de alimentação, este sistema é implementado num relé de proteção digital, que geralmente acompanha os motores, e possui por defeito transformadores de corrente. Deste modo, existe uma redução dos custos, uma vez que o sistema não necessita de sensores adicionais.

Numa bancada laboratorial foram ensaiados motores de baixa potência, tendo sido, artificialmente, provocadas falhas e obtidos os respetivos índices de severidade. A discussão dos resultados demonstra a fiabilidade do sistema na avaliação da condição do estator e do rotor.

**Palavras-chave:** diagnóstico, espetro, falhas, manutenção preditiva, motor de indução, não invasivo, PCA, sistema, tempo real.



## **Abstract**

The induction motors are extensively used in industry for technical and economic reasons. It is considered extremely reliable, although as any other kind of motor, it is vulnerable to various types of failures.

As it performs crucial functions in the industrial production process, its failure results in huge economic losses. To tackle those failures, new predictive maintenance strategies were adopted, but the solutions offered by the market have considerable costs because they are based on multiple sensors that sometimes obligate the offline inspection of the motor, and require the intervention of a technical inspector to evaluate the data and assess the motor condition.

On this dissertation it was developed a system that intend to detect and diagnose fault(s), in an independent way and in real time, through a statistical (PCA) and spectral analysis. Requiring only the currents, this system is implemented in a digital protection relay, which usually accompanies the motor and possesses current transformers by default. Thus there is a significant costs reduction because the system doesn't requires additional sensors.

In laboratory, were made tests in low-power motors with artificial failures and obtained the respective severity indexes. The results demonstrate the reliability of the system in the assessment of the stator and rotor condition.

**Keywords:** diagnose, faults, induction motor, non-invasive, PCA, predictive maintenance, real-time, spectrum, system.





# Índice de Matérias

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>i</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>v</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Acrónimos .....</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Símbolos .....</b>	<b>xvii</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Estrutura .....	3
<b>2. Estado da Arte .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Estratégias de Manutenção.....</b>	<b>5</b>
2.1.1. Tipos de Manutenção .....	7
2.1.2. Manutenção Preditiva Offline.....	9
2.1.3. Manutenção Preditiva Online .....	9
<b>2.2. Falhas em Motores de Indução .....</b>	<b>10</b>
2.2.1. Falhas no Estator.....	13
2.2.2. Falhas nos Rolamentos .....	15
2.2.3. Falhas no Rotor .....	17
2.2.4. Excentricidades .....	19
<b>2.3. Técnicas de Detecção e Diagnóstico de Falhas.....</b>	<b>20</b>
2.3.1. Técnicas não Elétricas.....	21
2.3.2. Técnicas Elétricas .....	23
<b>2.4. Sistemas de Diagnóstico Existentes.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5. Sistema Proposto .....</b>	<b>29</b>
<b>3. Sistema Desenvolvido .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1. Análise de Componentes Principais.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2. Identificação e Diagnóstico de Falhas.....</b>	<b>34</b>
3.2.1. Motor Saudável.....	35

3.2.2. Motor com Falha no Estator.....	36
3.2.3. Motor com Falha no Rotor.....	40
3.2.4. Barras Quebradas .....	44
<b>3.3. Verificação de Regime Estacionário .....</b>	<b>49</b>
<b>4. Implementação.....</b>	<b>53</b>
4.1. TPU M220 .....	53
4.2. Arquitetura.....	54
4.3. Fluxograma.....	59
<b>5. Resultados Experimentais.....</b>	<b>61</b>
5.1. Montagem.....	61
5.2. Falhas Provocadas .....	64
5.3. Metodologia.....	66
5.4. Motor Saudável .....	68
5.5. Motor com Falha no Estator .....	72
5.6. Motor com Falha no Rotor .....	76
5.7. Motor com Múltiplas Falhas .....	79
5.8. Motor com Excentricidades.....	80
<b>6. Conclusões e Trabalho Futuro .....</b>	<b>83</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>87</b>
<b>Anexo A .....</b>	<b>97</b>

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Metodologia utilizada.....	3
Figura 2.1 - Objetivos da manutenção industrial [11].....	5
Figura 2.2 – Causas das paragens forçadas na fábrica finlandesa de papel Stora Enso [12]. ....	6
Figura 2.3 – Estrutura do processo de manutenção preditiva online.....	9
Figura 2.4 - Vista explodida do MITF com rotor em gaiola de esquilo (adaptado de [19]). ....	10
Figura 2.5 - Tipos de rotor do MITF (A) em gaiola de esquilo (B) bobinado [20].....	11
Figura 2.6 – Média não ponderada dos resultados dos estudos realizados em [23], [24] e [25].....	12
Figura 2.7 – Tipos de falhas no estator. ....	13
Figura 2.8 – Danos no isolamento devido a sobreaquecimento (adaptado de [8]). ....	14
Figura 2.9 – Falhas no estator (A) curto-circuito entre espiras, (B) curto-circuito entre fases e (C) ligação à terra [31].....	14
Figura 2.10 – Rolamento (A) de rolos cilíndricos e (B) de esferas (adaptado de [32]). ....	15
Figura 2.11 – Situações de incorreta instalação dos rolamentos por (A) desalinhamento no veio, (B) deflexão do veio, (C) anel exterior torcido e (D) anel interior torcido [34].....	16
Figura 2.12 – Exemplo de danos físicos no anel interior do rolamento [35]. ....	16
Figura 2.13 – Tipos de MITF com rotor em gaiola de esquilo (A) fabricado e (B) fundido [36].....	17
Figura 2.14 – Resultados obtidos pelos estudos do IEE-IAS e EPRI, para falhas no rotor. ....	18
Figura 2.15 – Rotor com múltiplas barras quebradas [38]. ....	18
Figura 2.16 – Motor excêntrico [39]. ....	19
Figura 2.17 – Técnicas de monitorização da condição do MITF.....	20
Figura 2.18 – Aplicações da termografia nos MITFs (A) carcaça, (B) rolamentos e (C) acoplamento dos veios [48]. ....	22
Figura 2.19 – Analisador do espectro de vibrações, fabricado pela SKF [77].....	26
Figura 2.20 – Equipamento de deteção utilizado em [78].....	27
Figura 2.21 – Equipamento proposto por [79] para diagnóstico de falhas.....	27

Figura 2.22 – Sistema de monitorização produzido pela empresa TIMKEN [80].	28
Figura 2.23 – Sistema <i>Predictor</i> [81].	28
Figura 2.24 – Equipamento modular CompactRIO [83].	29
Figura 3.1 – Padrão descrito pelo vetor (A) motor saudável, (B) falha no estator e (C) falha no rotor.	32
Figura 3.2 – Modelo Matlab-Simulink <sup>®</sup> do MIFT utilizado (A) diagrama de blocos e (B) janela de configuração das falhas e parâmetros do motor.	34
Figura 3.3 – Análise teórica do motor saudável em regime nominal (A) correntes no estator, (B) padrão $\alpha\beta$ e vetores próprios e (C) valores próprios.	35
Figura 3.4 - Análise teórica do motor em regime nominal com 20% do enrolamento da fase A do estator curto-circuitado (A) correntes no estator, (B) padrão $\alpha\beta$ e vetores próprios e (C) valores próprios.	36
Figura 3.5 – Padrão descrito pelo vetor para falhas no enrolamento de diferentes fases do estator.	37
Figura 3.6 – Evolução da excentricidade da elipse para diferentes percentagens de enrolamento do estator curto-circuitado, em funcionamento nominal.	37
Figura 3.7 – Comportamento da excentricidade das elipses desenhadas a partir de padrão $\alpha\beta$ e do resultado da PCA, com o aumento da gravidade da falha no estator, em funcionamento nominal.	38
Figura 3.8 – Índice de severidade para diferentes percentagens de enrolamento do estator curto-circuitado e diferentes binários de carga.	39
Figura 3.9 – Fluxograma do mecanismo de deteção e diagnóstico de falha no estator.	39
Figura 3.10 – Correntes no estator do motor em regime nominal, com 50% do enrolamento da fase A do rotor curto-circuitado.	40
Figura 3.11 - Análise teórica do motor em regime nominal, com 50% do enrolamento da fase A do rotor curto-circuitado (A) correntes no estator, (B) padrão $\alpha\beta$ e vetores próprios e (C) valores próprios.	41
Figura 3.12 - Evolução do (A) padrão e dos (B) valores próprios para diferentes percentagens de enrolamento do rotor curto-circuitado, em funcionamento nominal.	42

Figura 3.13 - Índice de severidade para diferentes percentagens de enrolamento do rotor curto-circuitado e diferentes binários de carga. ....	43
Figura 3.14 - Fluxograma do mecanismo de deteção e diagnóstico de falha no rotor. ....	43
Figura 3.15 – Espectro da corrente dos motores com (A) 2 BRQ (B) 9 BRQ. ....	45
Figura 3.16 – Espectro de magnitude da corrente no motor com 2 BRQ. ....	46
Figura 3.17 - Espectro do quadrado da corrente dos motores com (A) 2 BRQ e (B) 9 BRQ. ....	48
Figura 3.18 - Fluxograma do mecanismo de deteção e diagnóstico de falha nas barras do rotor. ....	49
Figura 3.19 - Análise teórica do motor saudável ao ser variado o binário de carga (A) correntes no estator, (B) padrão e vetores próprios e (C) valores próprios. ....	50
Figura 4.1 – Painel (A) frontal e (B) posterior da TPU. ....	53
Figura 4.2 – Diagrama de casos de uso do Administrador. ....	55
Figura 4.3 – Diagrama de caso de uso do Utilizador. ....	56
Figura 4.4 – Mecanismo de janela deslizante utilizado na análise PCA. ....	58
Figura 4.5 – Fluxograma do SDDF desenvolvido. ....	59
Figura 5.1 – Montagem experimental. ....	61
Figura 5.2 – Ligações trifásicas na TPU M220. ....	62
Figura 5.3 – Motores trifásicos utilizados com (A) terminais de alimentação alterados e (B) chapa de características. ....	63
Figura 5.4 – (A) Gerador De Lorenzo 1025 e (B) chapa de características. ....	63
Figura 5.5 – (A) Unidade medição/controlo da marca De Lorenzo, modelo DL 10050, e (B) transdutor ótico presente no gerador. ....	64
Figura 5.6 – Estroboscópio utilizado. ....	64
Figura 5.7 – Falha num enrolamento do estator. ....	65
Figura 5.8 – Falha no rotor devido a barras furadas. ....	65
Figura 5.9 – Falha no rotor devido excentricidades provocadas por disco com pesos na periferia. ....	66
Figura 5.10 – Equipamento <i>JTAG XDS510</i> , utilizado para depuração. ....	67
Figura 5.11 – Análise experimental do motor saudável, a 73% do regime nominal (A) correntes no estator, (B) padrão e vetores próprios, (C) valores próprios e (D) espectro do quadrado da corrente. ....	68

Figura 5.12 – Comportamento dos índices de severidade do (A) estator, (B) rotor e (C) barras quebradas do motor saudável, com a variação da carga aplicada. ....	70
Figura 5.13 - Análise experimental do motor saudável, fazendo variar o binário aplicado (A) correntes no estator, (B) padrão e vetores próprios, (C) valores próprios e (D) espectro do quadrado da corrente. ....	71
Figura 5.14 – Análise experimental do motor com 70% de FE, a 73% do regime nominal (A) correntes no estator, (B) padrão e vetores próprios, (C) valores próprios e (D) espectro do quadrado da corrente. ....	73
Figura 5.15 – Orientação dos vetores próprios conforme a falha afetada no caso de 60% FE, a 73% do regime nominal (A) fase A, (B) fase B e (C) fase C. ....	74
Figura 5.16 – Evolução da excentricidade e valores próprios em motor a 73% do regime nominal com (A) 30% FE (B) 60% FE (C) 70% FE. ....	74
Figura 5.17 – Comportamento dos IS (A) do estator, (B) do rotor e (C) de barras quebradas, do motores com 30%, 60% e 73% de FE, fazendo variar a carga aplicada. ....	75
Figura 5.18 – Padrão , vetores e valores próprios do motor com (A) 2 BRQ e (B) 9 BRQ, a 73% do regime nominal. ....	76
Figura 5.19 – Espectro do quadrado da corrente dos motores com (A) 2 BRQ (B) 9 BRBQ, a 73% do regime nominal. ....	78
Figura 5.20 - Comportamento dos IS (A) do estator, (B) do rotor e (C) de barras quebradas, do motor saudável e dos motores com 2 BRQ e 9 BRQ, fazendo variar a carga aplicada. ....	79
Figura 5.21 – Comportamento dos IS (A) do estator, (B) do rotor e (C) de barras quebradas, para os motores com 30% de FE, 2 BRQ e 30% FE em simultâneo com 2 BRQ, fazendo variar a carga aplicada. ....	80
Figura 5.22 – Espectro do quadrado das correntes do (A) motor saudável e do (B) motor com disco acoplado. ....	81

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Causas de 100 graves acidentes em centrais petroquímicas[15].	6
Tabela 2.2 – Comparação das estratégias de manutenção direcionadas para a indústria.	8
Tabela 2.3 – Resultados dos estudos realizados pelo IEE-IAS, EPRI e Bonnet e Soukup.	12
Tabela 3.1 - Cálculo analítico das frequências características através da corrente.	45
Tabela 3.2 – Frequências dos componentes introduzidos com o quadrado da corrente.	47
Tabela 3.3 – Variância obtida nas simulações efetuadas.	51
Tabela 5.1 – Lista dos ensaios realizados.	67
Tabela 5.2 – Diagnóstico do motor saudável, efetuado pela TPU M220.	69
Tabela 5.3 - Diagnóstico do motor saudável com variação do binário, efetuado pela TPU M220.	71
Tabela 5.4 – Valores médios dos valores próprios principais, por intervalo.	72
Tabela 5.5 – Diagnóstico do motor com 70% de FE, efetuado pela TPU M220.	73
Tabela 5.6 - Diagnóstico efetuado pela TPU M220, do motor com (A) 2 BRQ e (B) 9 BRQ.	77





## Acrónimos

BRQ	Barras do Rotor Quebradas
CCS	Code Composer Studio
cv	Cavalo Vapor
DC	Corrente Contínua
DSP	Digital Signal Processor
IEC	International Electrotechnical Comission
IEEE-IAS	Institute of Electrical and Electronic Engineers – Industry Applications Society
EPRI	Electric Power Research Institute
FE	Falha no Estator
FFT	Transformada Rápida de Fourier
FPGA	Field-Programmable Gate Array
FR	Falha no Rotor
IS	Índice de Severidade
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
MITF	Motor de Indução Trifásico
PCA	Análise de Componentes Principais
RPM	Rotações por Minuto
SDDF	Sistema de Detecção e Diagnóstico de Falhas
SMCTR	Sistema de Monitorização da Condição em Tempo Real
TCP/IP	Transmission Control Procotol/Internet Protocol
TPU	Unidade Terminal e de Proteção
USB	Universal Serial Bus
VP	Vetor de Park



## Lista de Símbolos

A B C	Fases Elétricas	
$C$	Matriz Correlação	
$I$	Matriz Identidade	
$i_A i_B i_C$	Corrente Elétrica das Fases A, B e C	[A]
$i_\alpha i_\beta$	Corrente Resultantes da Transformada de Concordia	[A]
$i_M$	Valor Máximo de Corrente	[A]
$IS_{BRQ}$	Índice de Severidade de Barras Quebradas	
$IS_{estator}$	Índice de Severidade do Estator	
$IS_{rotor}$	Índice de Severidade do Rotor	
$f$	Frequência de Alimentação	[Hz]
$f_{amostragem}$	Frequência de Amostragem	[Hz]
$f_{BRQ}$	Frequência Característica de Barras Quebradas	[Hz]
$f_{BRQ_{quadrado}}$	Frequência Característica de Barras Quebradas, obtida pelo quadrado da corrente elétrica	[Hz]
k	Número Inteiro Positivo	
N	Número de Amostras	
s	Escorregamento Motor	
t	Tempo	[s]
$\lambda_1 \lambda_2$	Valor Próprio Principal e Secundário	
$v_1 v_2$	Vetor Próprio Principal e Secundário	



# 1. Introdução

Neste capítulo é feita uma breve contextualização e descrição dos objetivos do trabalho desenvolvido, bem como apresentada a estrutura da presente dissertação.

## 1.1. Contexto

Nos tempos que correm, o motor elétrico é utilizado em larga escala na conversão de energia elétrica em mecânica, tanto a nível doméstico como industrial, consumindo tipicamente 40% a 50% da energia elétrica produzida num país [1]. É neste último setor que o motor de indução trifásico (MITF) se encontra em grande escala devido, maioritariamente, a razões técnicas e económicas [2].

A sua simplicidade e baixo custo de construção, aliado à sua robustez e reduzida necessidade de manutenção, são fatores que o destacam dos demais e o tornam crucial nos países industrializados [3].

Apesar desta robustez, inevitavelmente a máquina irá sofrer desgaste e consequentemente acabará por avariar, sendo este processo acelerado por fatores de construção, local e tipo de operação [4]. Em casos extremos, a avaria pode imobilizar parcial ou totalmente um processo industrial, e dependendo da importância deste, originar um prejuízo económico bastante acentuado [5]. Noutros casos, existe um aumento do consumo elétrico, uma vez que o rendimento do motor é reduzido, associado a um sobreaquecimento dos enrolamentos para além dos limites toleráveis, podendo levar a danos catastróficos a nível do motor e da respetiva instalação elétrica [6].

Por norma, para que o funcionamento de uma fábrica não seja comprometido é feita uma inspeção periódica, preferencialmente nos ciclos de menor produção, onde é verificado o estado de todas as máquinas existentes ou das que desempenham um papel crítico. Pode também ser tomada uma abordagem mais extrema, onde se atua apenas após a ocorrência de avaria [7].

Ambos os casos têm associado um elevado custo económico que varia consoante o setor industrial, representando, em média, 92% das despesas anuais de manutenção numa fábrica, provém da manutenção das máquinas elétricas [8]. Por outro lado, também em [8], é estimado que apenas 10% do equipamento substituído nas verificações periódicas, está realmente em condições que o incapacitam de realizar a sua função.

Posto isto, surge a necessidade de uma monitorização contínua da condição dos motores, de modo a minimizar e otimizar os custos associados, e cuja importância tem vindo a ser reforçada com a atual conjuntura económica mundial. Adotando este tipo de monitorização torna-se possível

encontrar um equilíbrio económico visto que, sendo conhecida a condição do motor evita-se atingir extremos onde falhas provocam danos que impossibilitam o funcionamento do motor, permitindo que este opere durante o tempo para o qual foi projetado. Por outro lado, elimina-se a necessidade dos ciclos de inspeção periódica, onde os motores necessitam de ser verificados fora do seu local de operação.

## **1.2. Objetivos**

Inserida no tema apresentado anteriormente, esta dissertação procura otimizar um Sistema de Detecção e Diagnóstico de Falhas (SDDF) elétricas e mecânicas em motores de indução trifásicos que começou a ser desenvolvido em [9].

Trata-se de um sistema de monitorização não invasivo que, através da análise das correntes de alimentação do motor, avalia e descreve a sua condição em tempo real, durante o funcionamento. Deste modo, e tendo sido implementado num equipamento de proteção de motores, equipado, por defeito, com transformadores de corrente, deixam de existir os pesados custos de manutenção referidos anteriormente.

Numa primeira fase, e com base na revisão bibliográfica efetuada, o SDDF foi desenvolvido recorrendo a um modelo Matlab-Simulink<sup>®</sup> do motor de indução trifásico. Trata-se de um modelo particularmente útil pois possibilita a introdução de vários tipos de falhas e posterior recolha das correntes utilizadas pelo SDDF.

Após obtidos resultados satisfatórios, o SDDF foi programado num relé digital (TPU M220) produzido pela empresa EFACEC, cuja arquitetura e funcionalidades são descritas com detalhe no Capítulo 4. O papel deste relé passa por fornecer um diagnóstico visual da condição do motor em análise, tais como existência, origem e índice de gravidade da falha.

Por último o sistema é testado em laboratório, onde artificialmente são provocadas vários tipos de falhas em motores de baixa potência sob diversas condições de carga, de modo a comprovar a validade do sistema implementado e tornar viável uma possível comercialização do mesmo, a nível industrial [9].

A metodologia utilizada nesta dissertação pode assim, ser resumida segundo a figura seguinte.

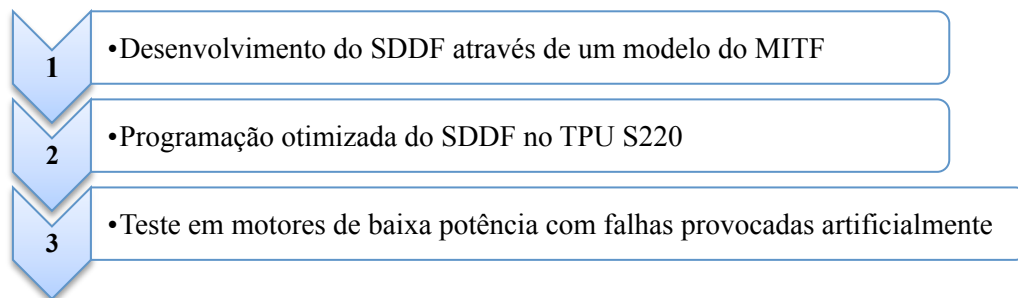


Figura 1.1 - Metodologia utilizada.

### 1.3. Estrutura

A presente dissertação está organizada em 6 capítulos, incluindo este introdutório.

No Capítulo 2 é abordado o tema da manutenção industrial, sendo feita uma comparação das estratégias que podem ser adotadas. Neste capítulo são também descritas as falhas que mais afetam os motores de indução e as respetivas técnicas de deteção e diagnóstico mais usuais. Por último é feita uma revisão bibliográfica dos mecanismos existentes e aplicados à indústria, no domínio científico em que se insere a presente dissertação.

No Capítulo 3 é apresentado, detalhadamente, o SDDF desenvolvido, sendo comprovado o seu funcionamento com base num modelo matemático em Matlab-Simulink<sup>®</sup>.

No Capítulo 4 é descrita a unidade TPU M220, onde foi implementado o SDDF, bem como as funcionalidades oferecidas por esta e também apresentada a arquitetura do sistema e o fluxograma que o descreve na sua totalidade.

No Capítulo 5 é feita uma avaliação do SDDF, quando aplicado a motores de baixa potência. Inicialmente é descrita a montagem experimental utilizada e a forma como foram provocadas, artificialmente, as falhas nos motores. Posteriormente são discutidos os resultados dos diagnósticos, obtidos a partir da TPU M220, tendo sido aplicados diversos níveis de carga e conjugadas várias falhas.

Por último, no Capítulo 6, são tiradas as principais conclusões do trabalho desenvolvido, juntamente com algumas sugestões para trabalho futuro.

No Anexo A é apresentado o código Matlab<sup>®</sup> do modelo desenvolvido, igualmente implementando na unidade TPU M220, embora em C++.



## 2. Estado da Arte

Neste capítulo, é inicialmente abordado o tema da manutenção industrial, sendo efetuada uma comparação entre os vários tipos que podem ser adotados. Em segundo lugar são descritas as falhas que mais frequentemente afetam os motores de indução e as respectivas técnicas de detecção e diagnóstico. Por último é feita uma revisão bibliográfica dos mecanismos existentes e aplicados à indústria, no domínio científico em que se insere a presente dissertação.

### 2.1. Estratégias de Manutenção

Na indústria têm vindo a ser adotadas estratégias de manutenção do equipamento utilizado, no sentido de aumentar a fiabilidade do processo de produção [10]. A manutenção industrial trata-se então de um conjunto de medidas e ações tomadas com o intuito de evitar inesperadas quebras do ciclo de produção, naturalmente danosas em termos económicos [5]. Na Figura 2.1 estão ilustradas as vantagens que advêm da manutenção, a nível industrial.

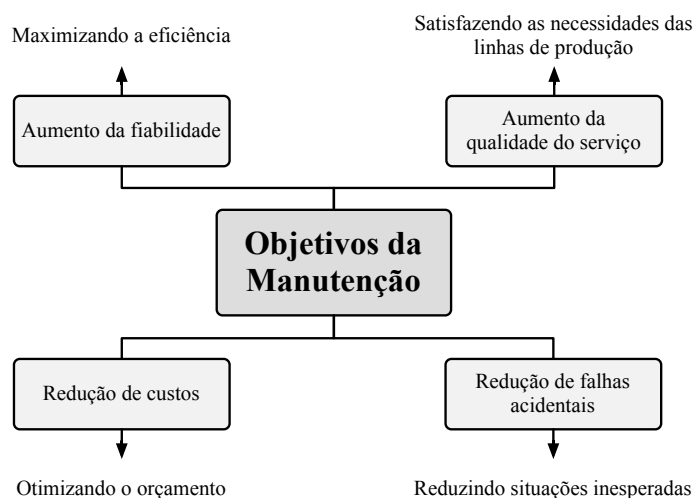


Figura 2.1 - Objetivos da manutenção industrial [11].

Estando os motores de indução presentes em praticamente todos os processos industriais e desempenhando muitas vezes funções cruciais, adotar uma estratégia de manutenção nestes equipamentos assume especial importância, no sentido de minimizar os custos económicos consequentes da sua avaria [10].

Têm vindo a ser feitos vários estudos, com vista a encontrar as principais causas das paragens inesperadas de instalações industriais. Em [12] o estudo incide sobre uma fábrica de papel finlandesa *Stora Enso*, tendo sido obtidos os resultados apresentados na figura abaixo.

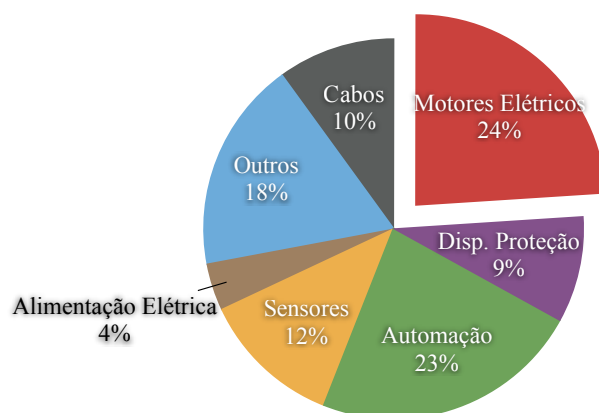


Figura 2.2 – Causas das paragens forçadas na fábrica finlandesa de papel Stora Enso [12].

A empresa americana *Refining Services* levou a cabo um estudo semelhante baseado em 65 refinarias onde se conclui que a maior causa (32%) das paragens forçadas destas, se deve a motores elétricos [13].

Com estes estudos, verifica-se que a avaria de motores elétricos representa uma porção considerável dos prejuízos gerados, devido à suspensão dos ciclos de produção industrial.

Para além dos motivos económicos, a implementação de um plano de manutenção apresenta também fortes benefícios a nível da segurança na instalação, através da diminuição da ocorrência de acidentes graves, por vezes fatais para os próprios operadores [14].

Em [15] são listadas 100 causas de graves acidentes, ocorridos em centrais petroquímicas que não adotaram qualquer estratégia de manutenção, conforme mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Causas de 100 graves acidentes em centrais petroquímicas[15].

Causas	Frequência	Causas	Frequência
Mecânicas	38	Naturais	7
Humanas	26	Design	4
Várias/Desconhecidas	12	Incêndio	3
Processos	10		

A análise da Tabela 2.1 permite concluir que as falhas mecânicas constituem a maior causa dos acidentes, considerados pelo autor como os mais graves. Deste modo, a monitorização dos sistemas mecânicos assume especial prioridade e importância. Sendo que os motores de indução representam grande parte deste grupo, reforça-se novamente a importância em se recorrer a estratégias de manutenção sobre estes equipamentos, com o intuito de otimizar os custos económicos e minimizar os danos a nível da instalação e dos respetivos operadores [16].

### **2.1.1. Tipos de Manutenção**

Na indústria podem ser tomadas três estratégias de manutenção dos motores elétricos [8]:

- Corretiva;
- Preventiva;
- Preditiva.

Na manutenção corretiva os problemas são resolvidos apenas após terem ocorrido. Por consequência este tipo de manutenção só se justifica nos motores cuja avaria não traga graves problemas económicos e de segurança da instalação, uma vez que nesta situação existe uma forte possibilidade da reparação do motor não ser viável, devido ao acumular de falhas ao longo do tempo [12].

Na manutenção preventiva são feitas inspeções/reparações periódicas aos motores durante as interrupções programadas da instalação industrial. O intervalo entre inspeções é regular, só alterado em períodos onde o ciclo de produção necessite de ser efetuado sem interrupções. Por esta razão, durante as inspeções é recomendável a troca de componentes ainda em boa condição, apenas por precaução, se bem que segundo [8], 90% destes não necessitassem de ser substituídos. Assim, este tipo de manutenção procura evitar as situações de paragem, verificadas na manutenção corretiva, apesar de implicar um custo adicional devido às periódicas verificações do estado de funcionamento e substituição desnecessária de componentes dos motores elétricos [17].

Por último, com a manutenção preditiva ou de verificação da condição, existe uma maximização da fiabilidade dos motores, juntamente com uma minimização dos gastos em rotinas de manutenção periódicas. Pode ser feita através de uma análise invasiva (offline), implicando a suspensão do funcionamento do motor de modo a ser ensaiado fora do local de operação, ou recorrendo a técnicas não invasivas (online). Estas últimas visam não perturbar o funcionamento do motor, sendo que o diagnóstico da sua condição é feito em tempo real, passando a existir uma monitorização contínua, ou mediante uma análise posterior de dados recolhidos através de sensores [12]. Tal metodologia evita a substituição desnecessária de componentes, que caracteriza a

manutenção preventiva, minimizando, até de forma mais eficaz, as paragens por avaria de motores elétricos.

Deste modo, é possível construir uma tabela que visa comparar os diferentes tipos de manutenção existentes a nível industrial.

Tabela 2.2 – Comparação das estratégias de manutenção direcionadas para a indústria.

<b>Tipo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Corretiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sem custos de operação, visto que só se intervém na existência de avarias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prejuízos económicos devido a inesperadas quebras de produção</li> <li>▪ Reparação dos motores não é rentável, implicando substituição</li> <li>▪ Reduzida eficiência energética</li> <li>▪ Grande inventário de reposição</li> <li>▪ Problemas de segurança da instalação/operadores</li> </ul>
Preventiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aumento da fiabilidade dos motores</li> <li>✓ Redução do inventário de reposição</li> <li>✓ Redução das quebras inesperadas de produção e consequentes prejuízos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custos de operação</li> <li>▪ Necessidade de interromper periodicamente o ciclo de produção, quando contínuo</li> <li>▪ Substituição desnecessária de componentes, por precaução</li> </ul>
Preditiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Contínua monitorização do estado do motor e respetivos componentes</li> <li>✓ Possibilidade de estimar o tempo de vida útil dos motores</li> <li>✓ Permite diagnóstico através de técnicas não invasivas</li> <li>✓ Otimização da rentabilidade e eficiência dos motores</li> <li>✓ Acentuada redução das quebras inesperadas de produção</li> <li>✓ Aumento do nível de segurança da instalação/operadores</li> <li>✓ Possível monitorização remota, através de rede de comunicação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Significativo custo de operação devido ao investimento em equipamento de medição/diagnóstico</li> <li>▪ Necessário sistema com inteligência artificial com alto nível de fiabilidade, de modo a não criar falsos alarmes</li> <li>▪ Investimento na formação de operadores para avaliar dados obtidos</li> </ul>

Sendo que a presente dissertação procura desenvolver um sistema de deteção e diagnóstico de falhas, com vista a ser utilizado seguindo uma manutenção preditiva, de seguida é feita uma descrição mais aprofundada desta estratégia.

### 2.1.2. Manutenção Preditiva Offline

Esta técnica é considerada como invasiva dada a necessidade de suspender o funcionamento do motor, para que sejam efetuadas as devidas verificações. Embora a grande parte dos testes possam ser feitos localmente a partir dos terminais elétricos do motor, alguns implicam a desmontagem parcial do mesmo, podendo este traduzir-se numa operação morosa [17].

Trata-se de um processo manual, realizado por operadores qualificados, em que a análise dos resultados muitas vezes é feita por estes de um modo empírico, trazendo vantagens como [12]:

- As poeiras e objetos estranhos, capazes de danificar o motor, podem ser removidos;
- Possível identificação de danos mecânicos, fugas, folgas, entre outros danos visíveis.

### 2.1.3. Manutenção Preditiva Online

Este tipo de manutenção tem vindo a ganhar força na indústria dado que faz uso de técnicas não invasivas, ou seja, o processo de produção industrial não sofre qualquer perturbação. Permite uma contínua monitorização do estado do motor, fornecendo informação acerca do desgaste existente, juntamente com outras notáveis vantagens [12]:

- As falhas podem ser detetadas na sua fase inicial;
- Possibilidade de automaticamente serem criadas tendências das falhas;
- Detecção de perturbações em tempo real;
- Motores de grande dimensão e/ou de difícil acesso (e.g. submersos) podem ser facilmente monitorizados.

Segundo [18], este sistema de monitorização em tempo real apresenta a estrutura ilustrada na Figura 2.3.

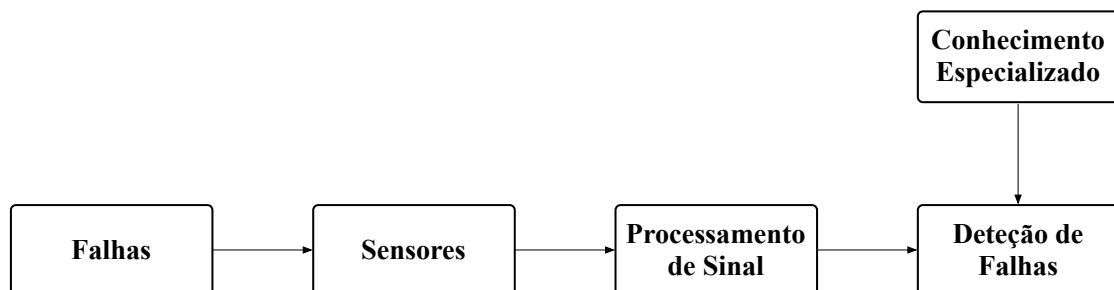


Figura 2.3 – Estrutura do processo de manutenção preditiva online.

Os sensores são utilizados para capturar dados que permitem avaliar a condição do motor. Estes podem ser de vários tipos, sendo os mais comuns de: corrente, tensão, fluxo magnético, binário mecânico, vibrações, velocidade, temperatura e ruído acústico [4].

Aos dados obtidos pelos sensores são aplicadas técnicas de processamento de sinal (e.g. análises em frequência), de modo a serem extraídas características ou parâmetros sensíveis à presença ou ausência de falhas específicas [18].

Na etapa final do processo de monitorização um operador qualificado procura analisar a informação fornecida pelo bloco anterior, no sentido de decidir se existe falha(s) no motor [18]. É sobre este ponto que a presente dissertação está focada, com vista a serem detetadas e diagnosticadas falhas sem intervenção humana, devido a uma automatização do processo. Por outro lado, sendo desenvolvido num relé digital (TPU M220) já com funções que asseguram a proteção elétrica do motor com base nas correntes/tensões de alimentação, o SDDF não acrescenta custos adicionais devido a sensores, uma vez que faz uso das correntes. Deste modo, para além da proteção do motor passa a existir também um diagnóstico da sua condição.

## 2.2. Falhas em Motores de Indução

O motor de indução trifásico é constituído por duas partes fundamentais, uma estacionária e outra rotativa, respetivamente o estator e o rotor, que se encontram separados através de um entreferro.

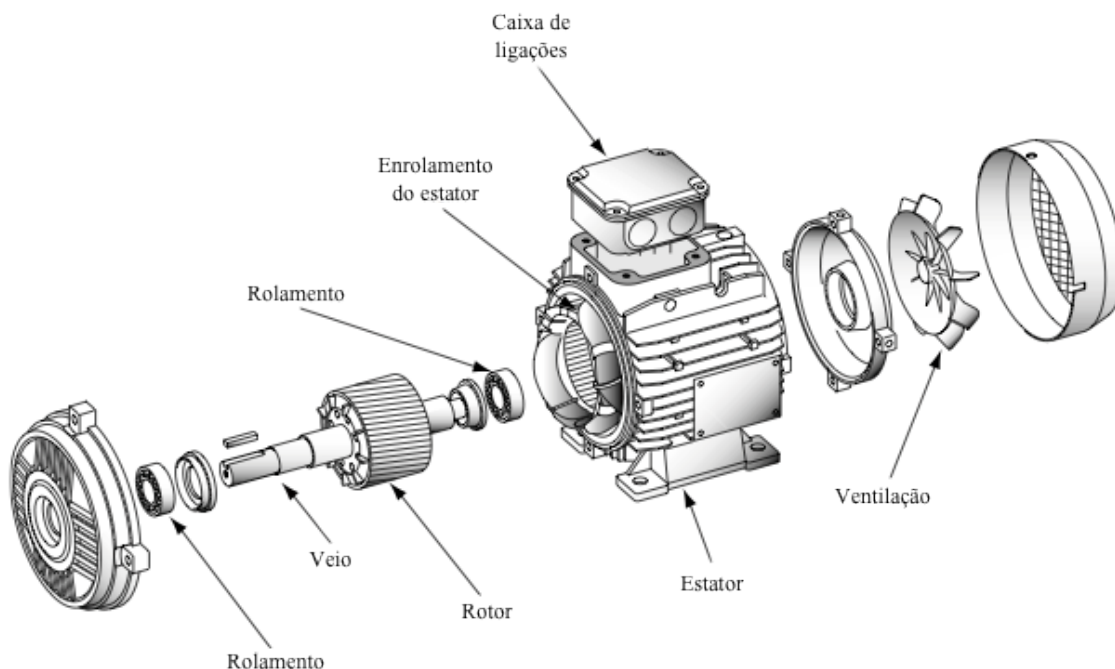


Figura 2.4 - Vista explodida do MITF com rotor em gaiola de esquilo (adaptado de [19]).

O estator consiste num núcleo cilíndrico laminado onde estão alojados três enrolamentos independentes, atravessados por um sistema trifásico de correntes.

De igual modo, o rotor é formado por um núcleo laminado, suportado por um veio mecânico assente em rolamentos, e pode apresentar duas configurações. A mais comum, em gaiola de esquilo, é composta por barras condutoras equidistantes e interligadas nas pontas (Figura 2.5-A).

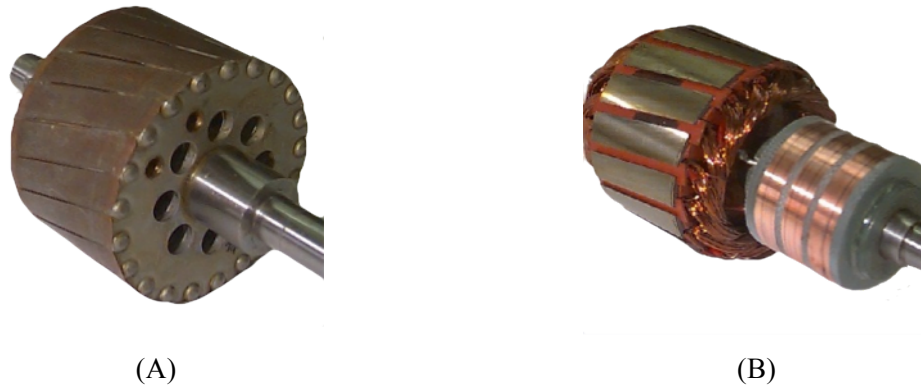


Figura 2.5 - Tipos de rotor do MITF (A) em gaiola de esquilo (B) bobinado [20].

Outro tipo consiste num rotor bobinado (Figura 2.5-B) onde os terminais dos enrolamentos estão acessíveis através de anéis e contactos deslizantes com escovas [21]. Deste modo, torna-se possível aumentar o binário inicial através da série de resistências de arranque.

Comparando as duas configurações, esta última implica um elevado custo de fabrico e posterior manutenção, apresentando uma menor eficiência energética, em comparação com motores semelhantes mas de rotor em gaiola de esquilo [22].

Apesar da provada robustez deste tipo de motores, inevitavelmente acabarão por surgir falhas nos componentes principais do motor: enrolamentos do estator e rotor e nos rolamentos que suportam o rotor.

De modo a identificar quais os componentes mais afetados, têm vindo a ser feitos estudos:

1. Em [23] o IEEE-IAS levou a cabo um estudo sob 1141 MITFs com mais de 200 cv;
2. Em [24] um estudo feito pelo EPRI incidiu em 4800 MITFs acima de 100 cv, tendo 97% dos casos o rotor em gaiola de esquilo;
3. Bonnett e Soukup em [25] fizeram um estudo em MITFs com potência acima de 100 cv.

Os resultados obtidos estão apresentados na figura abaixo, juntamente com um gráfico circular que representa as médias dos estudos mencionados.

Tabela 2.3 – Resultados dos estudos realizados pelo IEE-IAS, EPRI e Bonnet e Soukup.

Componente	Percentagem da falha (%)		
	IEE-IAS	EPRI	Bonnet e Soukup
Rolamentos	44	41	41
Estator	26	36	37
Rotor	8	9	10
Outros	22	14	12

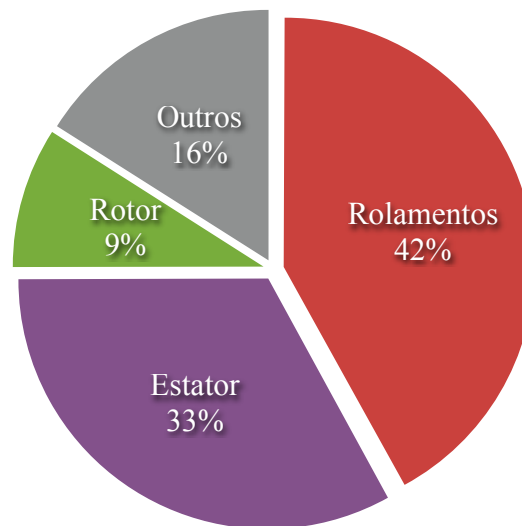


Figura 2.6 – Média não ponderada dos resultados dos estudos realizados em [23], [24] e [25].

Os resultados obtidos mostram que as principais falhas ocorrem nos rolamentos e no estator, ou seja, nos enrolamentos que o constituem.

Uma defeituosa lubrificação, aliada a uma excessiva sobrecarga do eixo que suportam, são os principais causadores dos danos a nível dos rolamentos [8].

As falhas no estator geralmente ocorrem devido a uma combinação de fatores térmicos, mecânicos, elétricos e ambientais [25].



### 2.2.1. Falhas no Estator

A nível do estator podem ocorrer vários tipos de falhas, sendo que 94% destas acontecem nos seus enrolamentos e as restantes no quadro e núcleo do motor [24].

Segundo [7], as falhas no estator estão divididas de acordo com a figura abaixo.

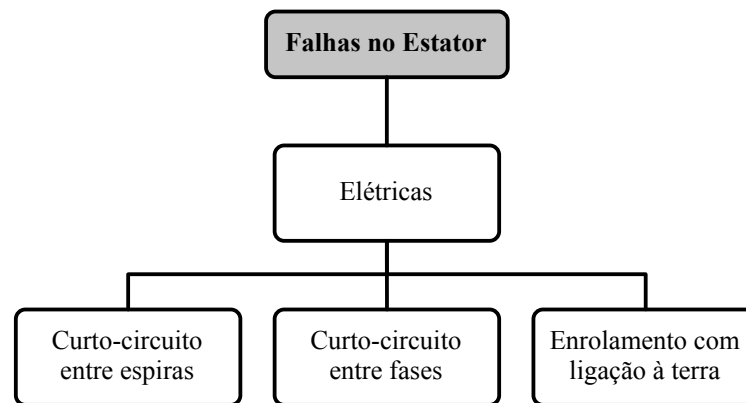


Figura 2.7 – Tipos de falhas no estator.

Embora com consequências diferentes, as falhas mencionadas devem-se à deterioração de um dos componentes intrínsecos mais frágeis de uma máquina elétrica, o isolamento. Um correto isolamento dos condutores existentes no estator, impede que a corrente circule por caminhos indesejados, prevenindo deste modo a existência de curto-circuitos entre estes. Por outro lado, o isolamento também funciona como dissipador térmico, de modo a reduzir o risco de sobreaquecimento dos condutores [17].

De acordo com [25], os materiais orgânicos utilizados no isolamento, sofrem uma deterioração devido à combinação de sobrecargas térmicas, transitórios, fatores mecânicos e contaminações.

Sendo que a vida útil do isolamento é reduzida em 50 % a cada 10° C acima da temperatura limite dos enrolamentos, as sobrecargas térmicas são consideradas como o principal causador da degradação do isolamento [26].

Quanto aos fatores mecânicos, o movimento dos condutores, vibrações, rolamentos defeituosos e excentricidades são responsáveis por um desgaste acelerado do isolamento. Sendo atravessados por correntes, os condutores submetidos a um campo magnético externo ficam sujeitos a forças proporcionais ao quadrado do valor da corrente, responsáveis por uma vibração dos mesmos. Não sendo elástico, o isolamento na zona onde os condutores têm maior liberdade de movimento (topo das espiras) acabará por estalar. A existência de rolamentos defeituosos e excentricidades podem provocar o embate do rotor no estator, causando a remoção do isolamento na zona de embate [27].

Por último, um motor contaminado devido à existência de objetos estranhos, pode levar a uma redução da capacidade de dissipação do calor bem como ao aumento do atrito localizado, causador de danos no isolamento [28].

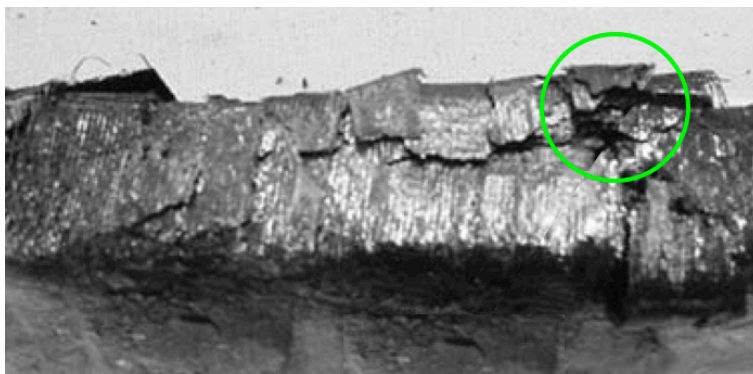
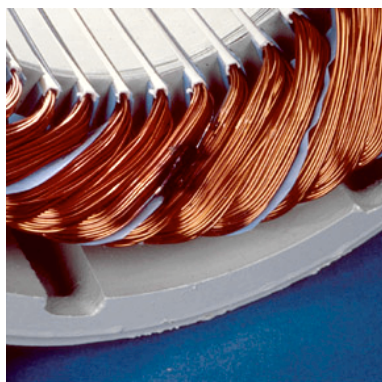


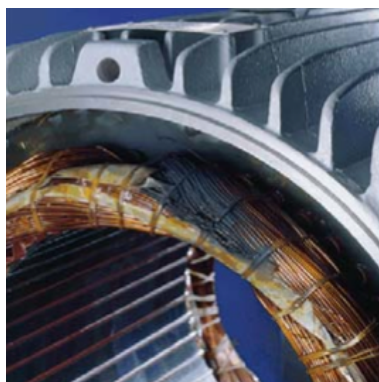
Figura 2.8 – Danos no isolamento devido a sobreaquecimento (adaptado de [8]).

Na ausência do isolamento, os enrolamentos ficam sujeitos a curto-circuitos. Um curto-circuito entre espiras de um enrolamento (Figura 2.9-A) provoca um desequilíbrio, dado que na fase afetada passarão a circular correntes mais elevadas. Sendo o calor gerado no enrolamento proporcional ao quadrado do valor da corrente, facilmente é atingido o limite térmico para o qual foi projetado, levando a graves danos no que resta do isolamento e posterior aumento de condutores curto-circuitados [29].

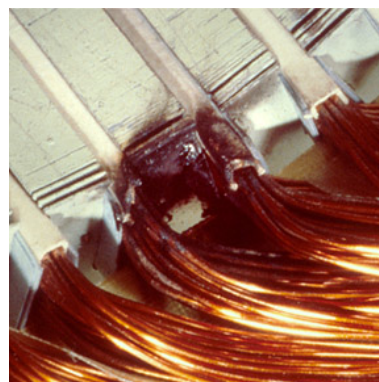
Embora o motor funcione, apesar do rendimento ser reduzido, caso o isolamento não seja repostado, a falha anterior irá provocar efeitos catastróficos, conduzindo a um curto-circuito entre fases (Figura 2.9-B) ou a uma ligação à terra (Figura 2.9-C) [30].



(A)



(B)



(C)

Figura 2.9 – Falhas no estator (A) curto-circuito entre espiras, (B) curto-circuito entre fases e (C) ligação à terra [31].

### 2.2.2. Falhas nos Rolamentos

Como referido e ilustrado na Figura 2.6, as falhas nos rolamentos são as que mais afetam os motores de indução, tendo ocorrido em cerca de 42% dos motores analisados nos estudos. A sua função passa por suportar o veio do motor e permitir o seu movimento de rotação.

Um rolamento é constituído por dois anéis, o interior e o exterior. Entre estes existe um conjunto de elementos rolantes (esferas ou rolos) colocados dentro de uma gaiola lubrificada, permitindo que rodem no seu interior [8].

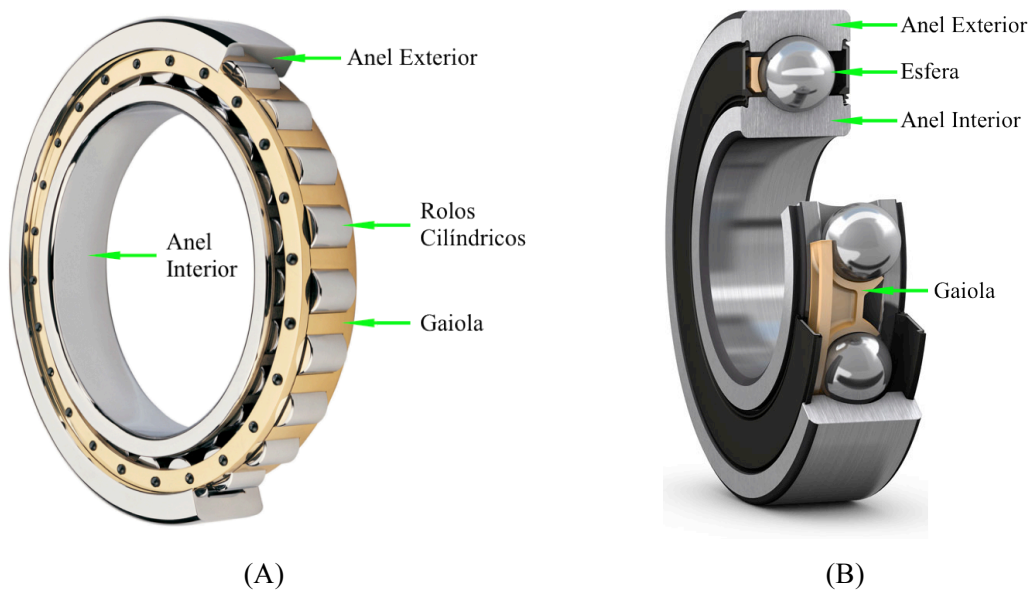


Figura 2.10 – Rolamento (A) de rolos cilíndricos e (B) de esferas (adaptado de [32]).

As falhas nos rolamentos incidem sob os componentes ilustrados na figura devido essencialmente à contaminação e posterior deterioração do lubrificante. Este fenómeno deve-se ao ambiente severo existente no meio industrial, onde se verifica a presença de materiais estranhos, água, ácido, humidade e poeiras [33].

Por outro lado, uma má lubrificação devido à carência/excesso de lubrificante aumenta o atrito nas esferas, levando a um acréscimo da temperatura no interior do rolamento. O calor excessivo acelera o processo de desgaste, visto que provoca a degradação do lubrificante [33].

Para além de problemas devido à lubrificação, o excesso de carga aplicada ao rolamento, bem como uma incorreta instalação dos mesmos no interior do MITF provocam um desalinhamento dos rolamentos acelerando o processo de desgaste, como mostra a Figura 2.11 [34].

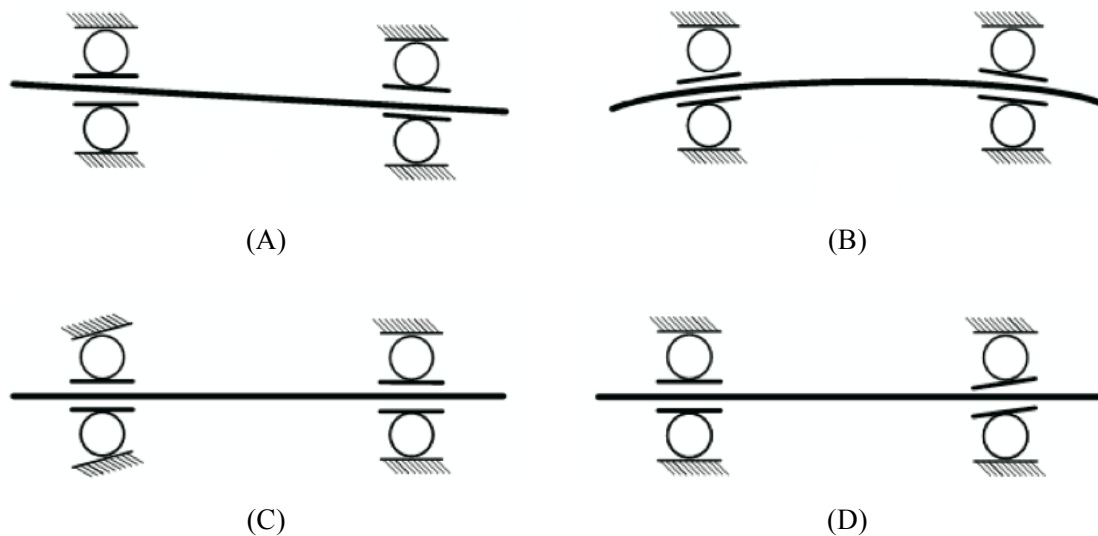


Figura 2.11 – Situações de incorreta instalação dos rolamentos por (A) desalinhamento no veio, (B) deflexão do veio, (C) anel exterior torcido e (D) anel interior torcido [34].

Quando frequentemente sob estas condições, o limite elástico do material é ultrapassado traduzindo-se em danos físicos irreversíveis na zona de contacto dos elementos rolantes (Figura 2.12).

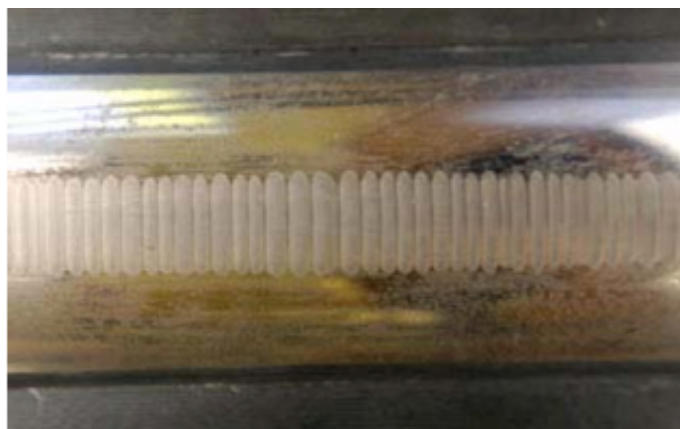


Figura 2.12 – Exemplo de danos físicos no anel interior do rolamento [35].

Os fatores mencionados anteriormente contribuem para o aparecimento de falhas, a médio e longo prazo, que segundo [30], originam:

- Vibrações e poluição sonora;
- Sobrecargas internas;
- Excentricidades.

### 2.2.3. Falhas no Rotor

Existem dois tipos de MITFs com rotor em gaiola de esquilo, o fundido e o fabricado, sendo o primeiro utilizado para potências até 3000 kW. Embora mais duráveis que os fabricados, a reparação de barras/anéis quebrados dos rotores fundidos é praticamente impossível devido ao processo de manufatura [30].

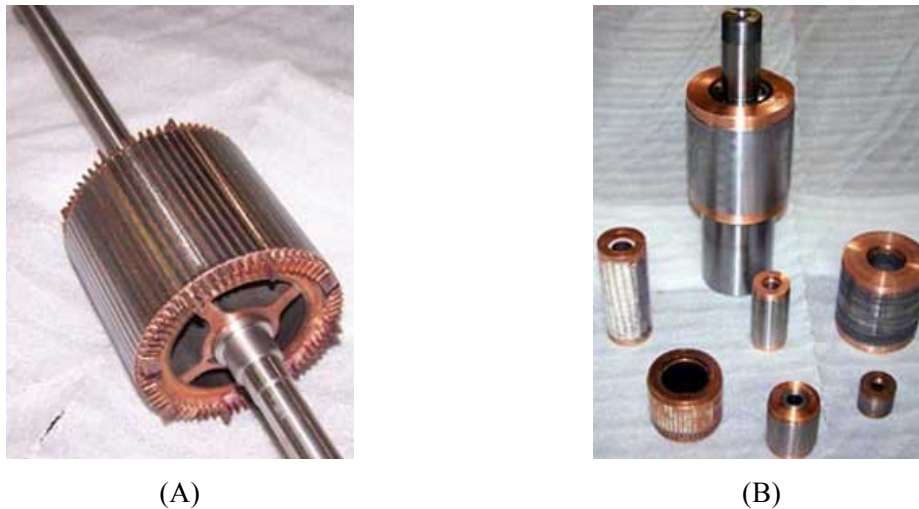


Figura 2.13 – Tipos de MITF com rotor em gaiola de esquilo (A) fabricado e (B) fundido [36].

Segundo [8] e [37], o aparecimento de falhas deve-se em grande parte do processo de manufatura do rotor:

- Existência de folgas permite o movimento das barras nas cavas;
- Má qualidade e geometria dos anéis de suporte das barras;
- Soldagem deficiente das barras com os anéis.

Por outro lado, os elevados *stresses* térmicos e mecânicos presentes também contribuem para o aparecimento de falhas. Durante o arranque, é gerada uma quantidade significativa de calor devido a correntes 5 a 6 vezes superiores às existentes no funcionamento nominal. Já em regime nominal, a elevada velocidade rotacional do motor faz com que intensas forças centrífugas incidam sobre o rotor [17].

Os estudos efetuados em [23] e [24], apresentados no início deste capítulo, mostram os componentes do rotor mais afetados pelas falhas, segundo a Figura 2.14.

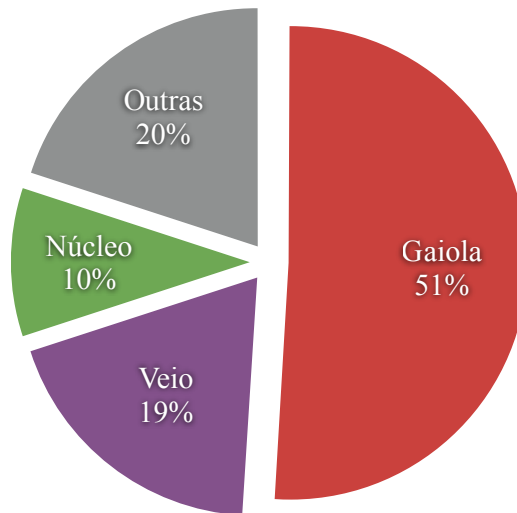


Figura 2.14 – Resultados obtidos pelos estudos do IEE-IAS e EPRI, para falhas no rotor.

Pela figura é possível verificar que o componente mais afetado é a gaiola do rotor. Sendo esta constituída por barras curto-circuitadas nas extremidades através de dois anéis (Figura 2.4), a falha manifesta-se pelo aparecimento de fissuras que levam a roturas completas nestes componentes [18].

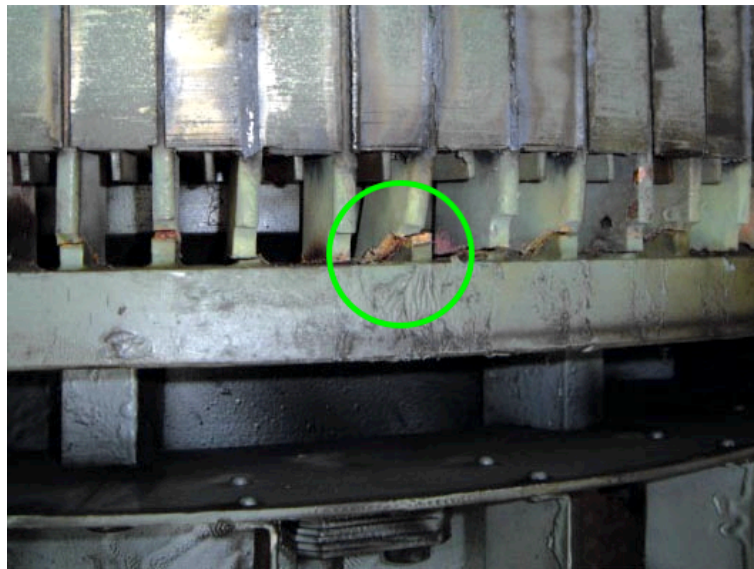


Figura 2.15 – Rotor com múltiplas barras quebradas [38].

Um pequena fissura numa barra, devido ao consequente sobreaquecimento gerado, causa a rotura completa da mesma fazendo com que nas restantes barras passem a circular correntes mais elevadas, aumentando o stress térmico e mecânico a que estão sujeitas. A rotura de uma barra pode assim, encadear um processo de deterioração em cadeia nas barras e no núcleo laminado, que constituem o rotor [8].



A existência de barras danificadas origina [25]:

- Vibrações e poluição sonora;
- Redução do rendimento, levando a um aumento do custo de operação;
- Excentricidades;
- Oscilações no binário e na velocidade de rotação.

#### 2.2.4. Excentricidades

Excentricidades no entreferro são comuns em motores de indução, e ocorrem quando os eixos geométricos do estator e do rotor deixam de ser coincidentes. Existem dois tipos de excentricidade: a estática e a dinâmica [39].

Recorrendo à Figura 2.16, torna-se fácil a compreensão das excentricidades existentes, onde o ponto C1 indica o centro do rotor e o C2 o centro do estator. Num motor sem excentricidades, o ponto C1 coincide com C2. No caso de excentricidade estática, o rotor gira em torno do seu próprio eixo geométrico que não é coincidente com o do estator, ou seja, C1 é diferente de C2.

Na excentricidade dinâmica, o rotor não é concêntrico e gira em torno do eixo geométrico do estator (C2) [40].

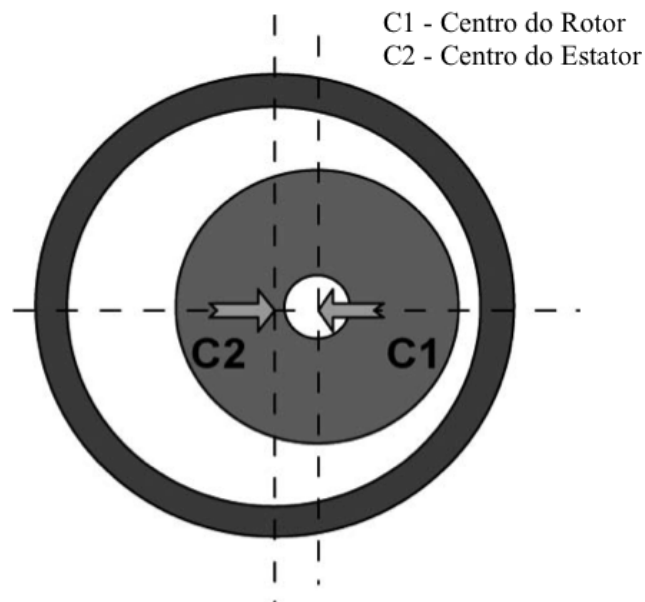


Figura 2.16 – Motor excêntrico [39].

Pode ainda acontecer o caso de existirem os dois tipos em simultâneo, ou seja, uma excentricidade mista [40].

Embora não seja possível construir um motor de indução livre de excentricidades, os fabricantes tentam reduzir ao máximo o seu nível, sendo tolerada uma excentricidade total na ordem dos 5% a 10% [39], [41].

As excentricidades mais acentuadas provêm da existência de outras falhas no motor, sendo que 80% dos motores afetados por falhas mecânicas, provocam um significativo aumento da sua severidade [42].

As causas que provocam a existência de excentricidades envolvem vários fatores. Podem ser causadas devido a falhas no rotor e estator já mencionadas, entre elas [39]:

- Sistema trifásico desequilibrado;
- Rolamentos danificados;
- Veio do motor curvado;
- Manufatura e montagem defeituosa do motor.

Um rotor excêntrico provoca a distorção da distribuição da densidade fluxo magnético no entreferro, levando a um desequilíbrio causador de uma perigosa sobrecarga mecânica no veio e rolamentos do motor, podendo originar o embate do rotor com o estator [43].

### 2.3. Técnicas de Detecção e Diagnóstico de Falhas

Sendo o MITF extremamente simétrico, a presença de qualquer tipo de falha provoca alterações na sua simetria. Deste modo na existência de falha(s), a interação de fluxo entre o estator e o rotor é afetada, resultando em perturbações nas correntes do estator, tensões, campo magnético e vibrações do motor [18]. As técnicas mais usuais e relevantes de monitorização dos MITFs, que permitem a deteção e diagnóstico de falha(s) são apresentadas na figura seguinte [44].

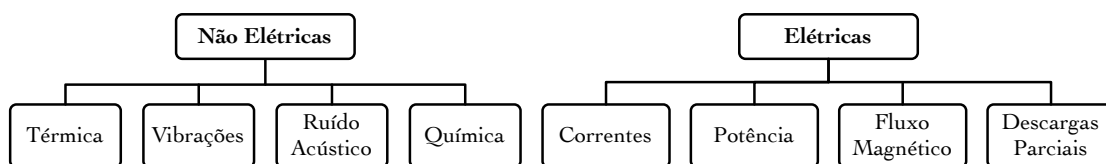


Figura 2.17 – Técnicas de monitorização da condição do MITF.



### **2.3.1. Técnicas não Elétricas**

A análise térmica do MITF permite detetar e prevenir falhas a nível dos enrolamentos do estator, dos rolamentos e do desalinhamento entre os veios. Uma vez que a vida útil do isolamento dos condutores no estator é reduzida para metade, por cada 10° acima da temperatura máxima [26], a monitorização térmica da carcaça do motor pode impedir uma deterioração acelerada do mesmo. Por outro lado, como referido na Secção 2.2.1, a existência de falhas no estator reflete-se numa sobrecarga térmica dos enrolamentos, permitindo a sua deteção através deste tipo de monitorização.

No caso dos rolamentos, o desgaste das esferas e uma lubrificação anormal origina atritos no interior dos anéis (Secção 2.2.2), aumentando a temperatura nesta zona do motor. O desalinhamento entre o veio do motor e o da carga provoca do mesmo modo, um aquecimento acentuado na zona de acoplamento deste.

De forma a que não sejam excedidos os limites térmicos dos diferentes componentes do motor, a monitorização da temperatura pode ser efetuada de várias formas: medição local através de sensores, termografia e estimação [45].

Uma medição local da temperatura, passa pela colocação de sensores embebidos no isolamento dos condutores do estator e/ou na carcaça do motor [17]. Embora ofereça um acompanhamento preciso da temperatura nos pontos desejados, o custo dos sensores faz com que esta técnica seja rentável apenas em motores de elevada potência [46]. Por outro lado, quando estes sensores não são instalados durante o processo de montagem do motor, a sua aplicação posterior torna-se significativamente mais dispendiosa [47].

A termografia permite elaborar um mapa térmico de uma superfície do motor, possibilitando identificar anomalias sem a necessidade de entrar em contato com o mesmo. Esta técnica necessita de ser efetuada manualmente, através de um técnico qualificado que efetua o diagnóstico com base nos mapas térmicos obtidos, embora tenham vindo a ser feitos progressos no sentido de automatizar este processo recorrendo a meios computacionais [5].

O recurso à termografia permite, principalmente, identificar sobreaquecimentos da carcaça (Figura 2.18-A), dos rolamentos (Figura 2.18-B) e desalinhamento dos veios (Figura 2.18-C).

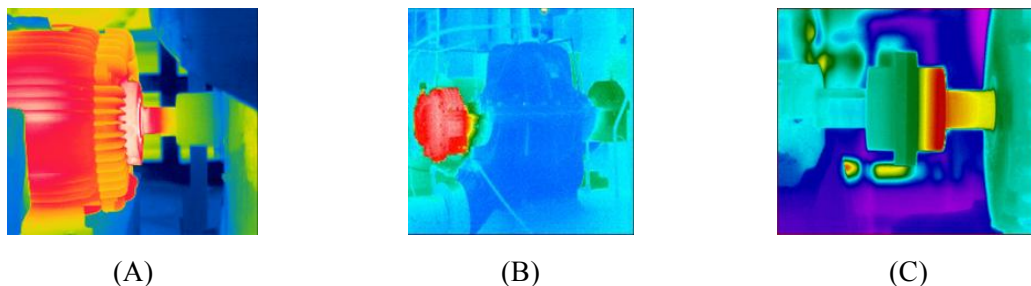


Figura 2.18 – Aplicações da termografia nos MITFs (A) carcaça, (B) rolamentos e (C) acoplamento dos veios [48].

De modo a contornar os custos associados às técnicas anteriores, têm sido desenvolvidas soluções de estimação da temperatura, com base na resistência dos enrolamentos do estator [49]-[51]. Através desta e recorrendo ao modelo térmico do MITF, os estudos concluíram ser possível estimar a temperatura nos enrolamentos, caso se admita que não existe obstrução da ventilação do motor e que a temperatura ambiente não sofre alteração.

A análise de vibrações é o tipo de monitorização mais antigo, focado na deteção de falhas nos rolamentos e desequilíbrios mecânicos [4]. As falhas nos rolamentos produzem frequências adicionais na vibração do motor, que variam consoante a sua geometria e velocidade de rotação [52]. O processo de deteção passa pela colocação de sensores de modo a identificar as frequências indicadas em [53], sendo necessário o conhecimento, no mínimo, da quantidade de esferas existentes no rolamento.

Embora este método tenha sido bastante utilizado no passado, a necessidade de colocação destes sensores em locais que implicam a desmontagem do motor, aliado ao custo dos próprios sensores têm-no tornado obsoleto [54]. Nos dias que correm, a deteção destas falhas tem vindo a ser feita com base nas correntes elétricas, segundo processos capazes de fornecer o mesmo nível de informação, sem a necessidade de incorporar sensores [55].

Recorrendo ao espectro do ruído também é possível identificar a existência de falhas, embora de forma muito limitada dada a dificuldade em eliminar o ruído de fundo existente no ambiente industrial, derivado de toda a maquinaria existente.

Por último pode ser efetuada uma análise química para verificar o estado do isolamento do motor. Esta técnica analisa as partículas produzidas pela degradação do isolamento, que se manifestam sob a forma de gás, líquida e sólida. Contudo, esta técnica envolve processos extremamente complexos e dispendiosos para os resultados que produz, sendo efetuada apenas em motores de grandes dimensões [8].

### 2.3.2. Técnicas Eléctricas

A análise das correntes eléctricas de alimentação dos motores, tem sido alvo das mais recentes investigações dada a elevada disponibilidade de aquisição. Uma vez que os equipamentos de proteção associados aos motores, geralmente utilizam as correntes, a sua aquisição não implica custos adicionais e é feita de forma não invasiva, ou seja, o funcionamento do motor não é afetado [8].

A técnica mais usual de identificação de falhas passa pela análise espectral das correntes, no sentido de identificar as harmónicas directamente relacionadas com as perturbações provocadas por estas, na distribuição do fluxo no motor [56].

O espectro das correntes de um motor perfeitamente simétrico possui apenas a frequência fundamental da rede de alimentação. Contudo, na existência de barras do rotor quebradas existe um adicional campo magnético girante inverso, que gira à velocidade do escorregamento, em relação ao rotor. Este campo atravessa os enrolamentos do estator e induz uma corrente com o dobro da frequência de escorregamento, afastada da fundamental por  $2 \cdot s \cdot f$ . Devido às oscilações na velocidade de rotação do motor, verifica-se também uma frequência na banda lateral direita da fundamental, afastada igualmente por  $2 \cdot s \cdot f$  [57].

Assim, a existência de danos nas barras do rotor é dado pelas frequências,

$$f_{BRQ} = (1 \pm 2 \cdot k \cdot s) \cdot f \quad (2.1)$$

sendo  $f$  a frequência de alimentação,  $s$  o escorregamento e  $k = 1, 2, 3, \dots$ . A amplitude destas frequências diminui com o aumento de  $k$ , pelo que em termos de diagnóstico de falhas, geralmente é utilizada apenas a frequência  $(1 \pm 2 \cdot s) \cdot f$  [58]. Contudo, esta amplitude não está dependente só da gravidade da falha, mas também da inércia do motor e do binário de carga aplicado [59]. Por outro lado, em situações de baixo escorregamento motor, as frequências  $f_{BRQ}$  encontram-se muito perto da fundamental, tornando o processo de identificação uma tarefa difícil, e impossível caso a gravidade da falha seja baixa [60].

Para além da deteção de barras quebradas, o espectro das correntes permite a deteção das frequência relacionadas com a existência de espiras dos enrolamentos do estator curto-circuitadas e a existência de excentricidades, através da identificação das respectivas frequências referidas em [61] e [16].

De igual modo, pode ser utilizado o espectro das correntes para diagnosticar falhas a nível dos enrolamentos, embora as investigações feitas tenham demonstrado resultados apenas em situações de falha com uma gravidade considerável [30].

Uma vez que o espectro é obtido através da transformada rápida de Fourier (FFT), é obrigatório que as correntes sejam obtidas em regime estacionário, isto é, que durante a aquisição não tenha ocorrido uma significativa variação na carga, ou outras perturbações [62]. Por esta razão, na existência de sinais transitórios, a transformada de Wavelet é preferida uma vez que fornece uma análise tempo-frequência [4].

Para além da análise espectral, existem outras técnicas de deteção e diagnóstico de falhas, que tiram partido da monitorização das correntes. A deterioração do isolamento dos condutores estatóricos provoca o aparecimento de uma componente de sequência negativa nas correntes de alimentação do motor. Testes realizados mostram que a amplitude da componente de sequência negativa é diretamente proporcional à corrente de curto-circuito, na situação de elevada impedância do caminho de fuga. Assim, esta componente pode ser utilizada como uma medida de avaliar a condição dos enrolamentos do estator, embora, os desequilíbrios dos sistemas de alimentação, provoquem de igual forma, o aparecimento inevitável destas componentes, levando a um diagnóstico incorreto. Por outro lado, as assimetrias existentes em todos os motores elétricos, provocam também o aparecimento das componentes mencionadas, reduzindo deste modo, a fiabilidade deste método [63] [64].

Também a nível dos enrolamentos, através do Vetor de Park (VP) é possível detetar a existência de curto-circuitos nas espiras. É feita uma representação bidimensional do sistema trifásico de correntes ( $i_A, i_B$  e  $i_C$ ) do motor, através de um conjunto de equações. Em condições ideais, a representação gráfica da componente dq resultante do VP descreve um padrão circular centrado na origem das coordenadas. A existência de curto-circuitos nas espiras dos enrolamentos provoca a transformação do padrão numa elipse, traduzindo-se assim num diagnóstico simples e bastante intuitivo [4]. Este método pode ainda ser combinado com uma análise espectral, da componente alternada do VP – método denominado por EPVA – de modo a poder ser incluída a deteção de danos nas barras do rotor, de motores em gaiola de esquilo [65], [66].

Outra técnica, para detetar falhas nos enrolamentos, passa pela verificação dos desvios dos valores eficazes das correntes, face ao valor nominal. Esta análise tem a desvantagem de necessitar de dados das correntes antes da falha ocorrer, de modo a existir uma base de comparação. Por outro lado, torna-se difícil de concluir da gravidade da falha dadas as assimetrias existentes nos motores, que podem induzir em falsos diagnósticos [67].

A monitorização das correntes e tensões em simultâneo, permite a análise da potência instantânea. Esta análise trás vantagens em relação à da corrente, principalmente na identificação das frequências que caracterizam a existência de barras do rotor quebradas, que como referido anteriormente, em situações de baixa gravidade da falha e escorregamento, torna-se um processo

difícil ou até impossível dada a proximidade com a fundamental [4]. No espectro da potência instantânea, as frequências dadas pela equação (2.1) continuam a existir numa banda lateral à fundamental, que passou a ser dada por  $2 \cdot f$ , embora a grande vantagem passe pelo aparecimento de frequências afastadas desta, definidas por [68],

$$2 \cdot k \cdot s \cdot f \quad (2.2)$$

sendo  $f$  a frequência de alimentação,  $s$  o escorregamento e  $k = 1, 2, 3, \dots$ . Por outro lado, a amplitude destas frequências é independente da inércia do motor, harmônicas da tensão de alimentação e da variação da carga do motor, aumentando a fiabilidade do diagnóstico realizado a partir destas [69], [70].

A monitorização do fluxo magnético axial passa pela medição do fluxo de fugas, através de uma bobina concêntrica com o veio, colocada dentro ou fora do motor [71]. Numa situação ideal, o fluxo axial deveria ser nulo, embora o mesmo não se verifique devido a imperfeições na manufatura dos motores e/ou desequilíbrios do sistema de alimentação [3], porém na presença de curtos-circuitos entre espiras do estator, as principais componente espectrais deste fluxo são passíveis de identificar, uma vez que são conhecidas as frequências características desta falha [72]. A grande desvantagem da monitorização do fluxo axial deve-se, por um lado, ao facto deste ser bastante variável com o nível de carga aplicado ao motor, e por outro, de certos materiais, que constituem a carcaça, e limitam a penetração do fluxo.

Por último, pode ser feita uma medição do nível de descargas parciais embora esta análise só tenha resultados em motores de grandes dimensões, superiores a 3 kV. Esta visa detetar a existência de danos no isolamento dos enrolamentos. No caso de se verificar a rotura do isolamento, a probabilidade de existir descargas parciais no interior do motor aumenta de aproximadamente 30 vezes [73]. Estas descargas produzem um impulso de tensão, que após circular pelos enrolamentos, pode ser medido nos terminais do motor (e.g. através de condensadores de desacoplamento). A ocorrência destas descargas, para além de depender do estado do isolamento, está relacionado também com a frequência elétrica, espessura do dielétrico, humidade e temperatura [74]. Posto isto, o diagnóstico apresenta uma incerteza considerável, dado que depende de fatores de natureza ambiental.

## 2.4. Sistemas de Diagnóstico Existentes

De modo a aumentar a fiabilidade bem como minimizar os prejuízos associados a paragens inesperadas dos ciclos de produção industriais, tem vindo a ser adotadas estratégias de manutenção dos motores, como referido na Secção 2.1.

Nos últimos anos a manutenção preditiva tem sido alvo de investigação, no sentido de desenvolver sistemas autónomos capazes de efetuar um diagnóstico dos motores elétricos, através de técnicas não invasivas, ou seja, sem que o seu normal funcionamento seja afetado.

Nesta Secção é feita uma revisão dos mecanismos existentes considerados mais relevantes, que utilizam, tal como o sistema desenvolvido nesta dissertação, processadores digitais de sinal e sensores não-invasivos para fornecer informação relevante, capaz de permitir ao operador concluir acerca da condição do motor.

Em [75] é apresentado um sistema que utiliza sensores de vibração para detetar e diagnosticar falhas nos rolamentos, através de dois DSP (TMS320C40). Com estes dados é feita uma análise espectral de modo a ser efetuado uma comparação com modelos de motores com e sem falha(s), no sentido de calcular a diferença nas amplitudes das frequências que indicam problemas a nível dos rolamentos. Segundo os autores, este equipamento elabora um correto diagnóstico em 99% dos casos.

De modo semelhante, em [76] é descrito um sistema de diagnóstico que utiliza um DSP (Altera Nios) e FPGA. São recolhidos dados de sensores de vibração acoplados ao motor, para apresentar, no LCD existente no equipamento, o respetivo espectro. A partir desta informação visual, cabe ao operador efetuar o diagnóstico do motor. Este tipo de equipamento, nos dias que correm, é vendido por um grande número de empresas, embora a preços elevados. Na figura seguinte é ilustrado um modelo de análise espectral das vibrações, produzido pela empresa sueca SKF.



Figura 2.19 – Analisador do espectro de vibrações, fabricado pela SKF [77].

Em [78] é apresentado um sistema constituído por uma placa de desenvolvimento com um DSP (TMS320LF2407), ilustrada na Figura 2.20.



Figura 2.20 – Equipamento de detecção utilizado em [78].

Trata-se de um sistema que verifica a existência de uma fase do estator em aberto, com base no valor máximo das correntes amostradas. Ao ser detetada, esta surge identificada no LCD da placa.

Em [79], através de um DSP (TMS320C32), foi implementado um complexo mecanismo de estimação do escorregamento do motor, através de uma inferência estatística, e um algoritmo de identificação da frequências das falhas, que faz uso do escorregamento.

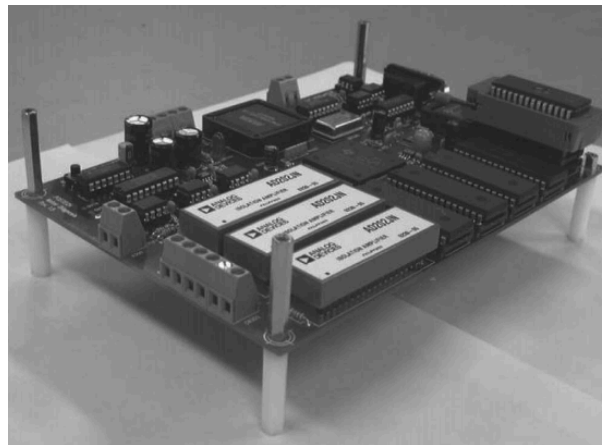


Figura 2.21 – Equipamento proposto por [79] para diagnóstico de falhas.

Através de um computador conectado a este equipamento, é dado ao operador a possibilidade de consultar a condição do motor em análise, obtida através da recolha das correntes de alimentação.

A empresa americana TIMKEN, oferece um sistema de monitorização da condição em tempo real através de um potente DSP, que permite adquirir e processar informações relativas a vários sensores [80].



Figura 2.22 – Sistema de monitorização produzido pela empresa TIMKEN [80].

Podem ser utilizados sensores analógicos, de vibrações e a nível dos rolamentos, bem como atuações através de portas analógicas. O equipamento ilustrado na Figura 2.22 tem como função a recolha e o envio dos dados para uma unidade (e.g. computador), onde são analisados pelos técnicos que, através destes, avaliam o estado do motor.

Na Figura 2.23 é apresentado outro equipamento de manutenção preditiva, chamado *Preditor* [81] e produzido pelo empresa brasileira PS, que faz uso de sinais de corrente e tensão para fornecer uma monitorização remota via rede TCP/IP.



Figura 2.23 – Sistema *Preditor* [81].

Deste modo, a ideia passa por colocar o *Preditor* junto ao motor, onde são ligados os sensores de corrente e tensão. Através da ligação à rede, um técnico pode observar, num computador afastado do local, a informação extraída através do *software* desenvolvido pela mesma empresa. Com este é dada a possibilidade de estabelecer alarmes, indicadores da existência de falha(s), sendo accionados na unidade onde são analisados.



Um outro equipamento, denominado por *CompactRIO* e produzido pela empresa americana *Texas Instruments*, foi utilizado em [82] com vista a detetar e diagnosticar falhas em motores de indução trifásicos. Trata-se de um equipamento formado por módulos que combinam um processador de tempo-real e FPGA reconfigurável no mesmo chassi.



Figura 2.24 – Equipamento modular CompactRIO [83].

Para o diagnóstico foi adicionado o módulo analógico responsável por adquirir os vários sinais necessários: correntes, tensões, fluxo e vibrações. As falhas são detetadas através dos espetros dos sinais recolhidos, no sentido de identificar as frequências que as caracterizam. Uma vez que as frequências das falhas dependem do escorregamento do motor, admite-se que é utilizado também um sensor de velocidade (e.g. tacómetro), embora os autores não mencionem como é obtida a velocidade de rotação. Deste modo, o sistema desenvolvido permite avaliar o estado do estator, rotor, excentricidades e rolamentos. A este sistema foi incluído um módulo que fornece indicação visual acerca da condição do motor, através de LED's.

## 2.5. Sistema Proposto

Fazendo uma análise dos sistemas mencionados anteriormente, é de assinalar que, embora os dados sejam adquiridos através de modernas técnicas não invasivas, o diagnóstico do motor é elaborado por um operador especializado, que conclui acerca do estado do motor. Por outro lado, a decisão passa pela análise de vários sinais, implicando a existência de múltiplos sensores no motor, aumentando assim os custos associados a esta operação.

O sistema de deteção e diagnóstico desenvolvido nesta dissertação procura minimizar a necessidade de avaliação por um operador, uma vez que a avaliação da condição do motor é feita localmente, de forma automática e em tempo real. Por outro lado, estando implementado num relé digital que oferece proteção elétrica, e que geralmente acompanha o motor desde o início do seu funcionamento, o sistema não trás custos adicionais a nível de sensores, uma vez que utiliza apenas a corrente elétrica. Embora recorra, tal como a maioria dos sistemas apresentados, à FFT, esta não é

aplicada diretamente à corrente, mas sim ao quadrado desta, deixando assim de parte, como será demonstrado no decorrer da dissertação, a necessidade de adquirir também a velocidade de rotação do motor.

### 3. Sistema Desenvolvido

Neste capítulo é feita uma descrição detalhada do sistema de detecção e diagnóstico desenvolvido, sendo comprovado o seu funcionamento com base num modelo matemático em Matlab-Simulink<sup>®</sup>.

#### 3.1. Análise de Componentes Principais

Formulada em 1901 por [84] e mais tarde por [85], a análise de componentes principais (PCA) tem vindo a provar ser uma poderosa ferramenta na monitorização de processos em ambiente industrial, com ênfase na detecção e diagnóstico de falhas [86], [87], [88].

Esta análise estatística permite transformar um conjunto de variáveis correlacionadas noutro de igual ou menor dimensão de variáveis não correlacionadas, com o mínimo de perda de informação [89]. Este conjunto resultante, denominado por componentes principais, encontra-se ordenado sendo que as primeiras variáveis retêm a maior parte da variação presente em todas as variáveis originais [90].

O sistema desenvolvido faz uso da PCA no sentido de obter um aumento da capacidade de detecção/diagnóstico. Por outro lado, torna possível uma identificação das variáveis responsáveis pela falha e/ou as mais afetadas por esta através de um conjunto de vetores ortogonais ordenados pela variância [91]. Esta análise estatística é feita a partir de um sistema bifásico de correntes, resultante da transformada de Concordia.

Utilizada na área das máquinas elétricas, esta transformada permite converter um sistema trifásico de correntes/tensões reais sem ligação de neutro, num equivalente bifásico fictício simplificado [92].

Aplicando a transformada de Concordia, as correntes trifásicas de alimentação do MITF  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$  originam correntes  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  através das seguintes equações,

$$\begin{cases} i_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}}(i_A - \frac{1}{2}i_B - \frac{1}{2}i_C) \\ i_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}i_B - \frac{1}{\sqrt{2}}i_C \end{cases} \quad (3.1)$$

Sob condições ideais, ou seja, um motor saudável e um sistema de alimentação equilibrado (correntes de alimentação do motor puramente sinusoidais), o vetor de correntes  $\alpha\beta$  descreve um círculo centrado na origem, uma vez que [93],

$$\begin{cases} i_\alpha = \frac{\sqrt{6}}{2} \cdot I_M \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ i_\beta = \frac{\sqrt{6}}{2} \cdot I_M \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (3.2)$$

Na presença de falhas existe uma distorção deste círculo, passando a apresentar as formas características do tipo de falha existente no motor, ilustradas na Figura 3.1. De notar que sendo este padrão desenhado a partir de correntes sinusoidais, é constituído pelo número de amostras existentes num período destas.

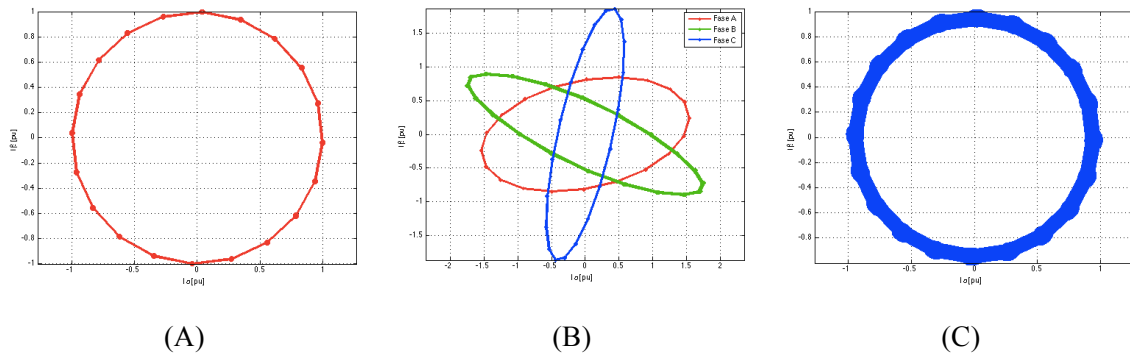


Figura 3.1 – Padrão descrito pelo vetor  $\alpha\beta$  (A) motor saudável, (B) falha no estator e (C) falha no rotor.

Para uma falha no estator, o padrão descrito pelo vetor assemelha-se a um elipse orientada conforme a fase, passando a aproximar-se a um *donut* na existência de falha no rotor [93].

No sentido de diagnosticar o real estado do motor, é aplicada a PCA, de modo a identificar qual a falha/padrão existente, bem como associar o respetivo índice de severidade (IS).

A PCA procura as direções onde um conjunto multivariável correlacionado apresenta maior variação. Neste caso a análise incide sobre duas variáveis ( $i_\alpha$  e  $i_\beta$ ), resultando um par de vetores ortogonais e o respetivo par de valores próprios [94]. O vetor (principal) com maior valor próprio indica a direção onde existe a maior variação dos dados, enquanto o segundo vetor, representa a direção de menor variação [90].

As componentes principais podem ser obtidas a partir da matriz covariância ou matriz correlação, das correntes  $\alpha\beta$ . Por razões de simplicidade de cálculo, com vista à otimização do sistema foi escolhido o segundo método.

A matriz correlação  $C$  é definida por 20 amostras de correntes  $\alpha\beta$ , de modo a ser analisado um período completo, tendo em conta a frequência com que são amostradas. Assim  $C$  é dada por,

$$C = \begin{bmatrix} i_{\alpha_1} & i_{\alpha_2} & \cdots & i_{\alpha_{20}} \\ i_{\beta_1} & i_{\beta_2} & \cdots & i_{\beta_{20}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{\alpha_1} & i_{\alpha_2} & \cdots & i_{\alpha_{20}} \\ i_{\beta_1} & i_{\beta_2} & \cdots & i_{\beta_{20}} \end{bmatrix}^T \quad (3.3)$$

Pela regra da multiplicação matricial, obtém-se uma matriz correlação de números reais, simétrica e equivalente a,

$$C = \begin{bmatrix} i_{\alpha_1}^2 + i_{\alpha_2}^2 + \dots + i_{\alpha_{20}}^2 & i_{\alpha_1} i_{\beta_1} + i_{\alpha_2} i_{\beta_2} + \dots + i_{\alpha_{20}} i_{\beta_{20}} \\ i_{\alpha_1} i_{\beta_1} + i_{\alpha_2} i_{\beta_2} + \dots + i_{\alpha_{20}} i_{\beta_{20}} & i_{\beta_1}^2 + i_{\beta_2}^2 + \dots + i_{\beta_{20}}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 = C_2 & C_4 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Esta matriz, tendo dimensões  $(2 \times 2)$ , possui dois valores próprios,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , e respetivos vetores próprios,  $v_1$  e  $v_2$ .

Os valores próprios são dados pelas raízes da equação característica,

$$|C - \lambda I| = 0 \quad (3.5)$$

Sendo uma matriz quadrada simétrica, as raízes deste determinante são reais e dadas por,

$$\begin{vmatrix} C_1 - \lambda & C_2 \\ C_2 & C_4 - \lambda \end{vmatrix} = 0 \Leftrightarrow \lambda^2 + (-C_1 - C_4) \cdot \lambda + (C_1 \cdot C_4 - C_2^2) = 0 \quad (3.6)$$

ou seja,

$$\lambda_{1,2} = \frac{C_1 + C_4 \pm \sqrt{C_1^2 - 2 \cdot C_1 \cdot C_4 + 4 \cdot C_2^2 + C_4^2}}{2} \quad (3.7)$$

O cálculo dos vetores próprios é feito através de,

$$C \cdot v = v \cdot \lambda \quad (3.8)$$

Quando aplicada a uma matriz simétrica  $2 \times 2$  de números reais, os valores próprios resultantes representam o comprimento do maior/menor semieixo de uma elipse, ou o raio de um círculo, no caso de serem iguais. O maior semieixo encontra-se orientado segundo a direção dada pelo vetor com maior valor próprio [95].

### 3.2. Identificação e Diagnóstico de Falhas

Os vetores e valores próprios obtidos pela análise de componentes principais possibilitam a identificação da falha e posterior diagnóstico acerca da gravidade que esta apresenta.

Para avaliar a validade deste método, foi utilizado um modelo matemático do MITF descrito em [57] desenvolvido na linguagem de blocos do Matlab-Simulink®, como ilustrado na Figura 3.2.

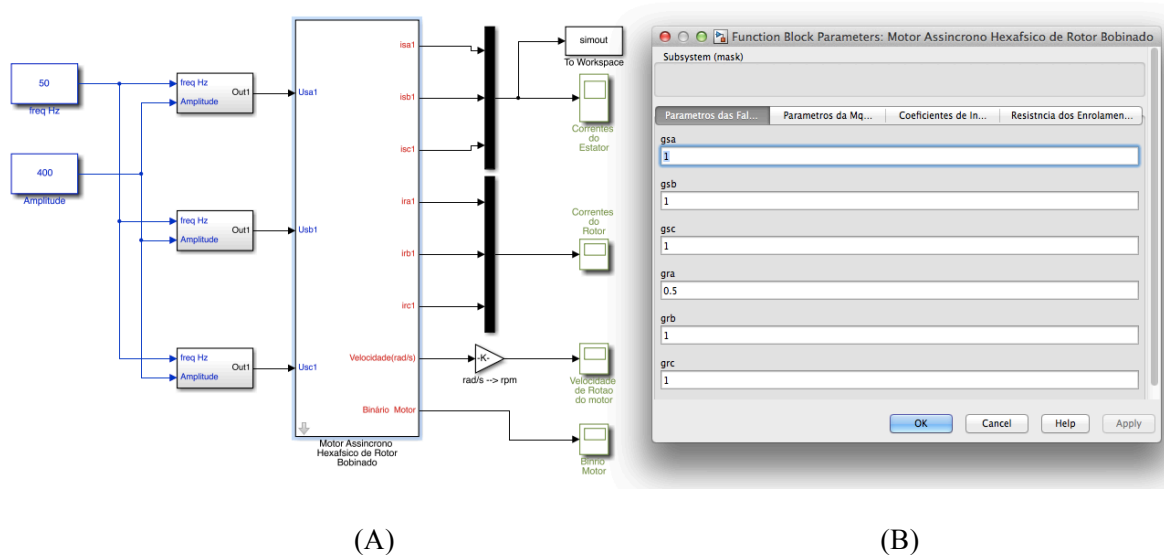


Figura 3.2 – Modelo Matlab-Simulink® do MITF utilizado (A) diagrama de blocos e (B) janela de configuração das falhas e parâmetros do motor.

A vantagem deste modelo em relação aos existentes está na possibilidade de aplicar falhas no estator/rotor com a gravidade desejada e observar o efeito nas respetivas correntes e na velocidade de rotação do motor.

Neste modelo é possível alterar o binário de carga aplicado nos instantes temporais desejados, tendo sido escolhido os seguintes patamares, do binário nominal: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.

Face aos referidos padrões desenhados pelas várias falhas, as análises seguintes, através da PCA das correntes de alimentação do MITF, procuram extrair informação que permita inferir o padrão existente, bem como associar um índice de severidade coerente com a gravidade da mesma. Estas incidem sobre as correntes obtidas apenas em regime estacionário, tendo sido descartado o arranque do motor.

### 3.2.1. Motor Saudável

Em regime nominal, foram obtidas as correntes ilustradas na Figura 3.3-A, tendo sido aplicado a PCA às correntes  $\alpha\beta$  calculadas analiticamente, segundo o processo descrito na Secção 3.1

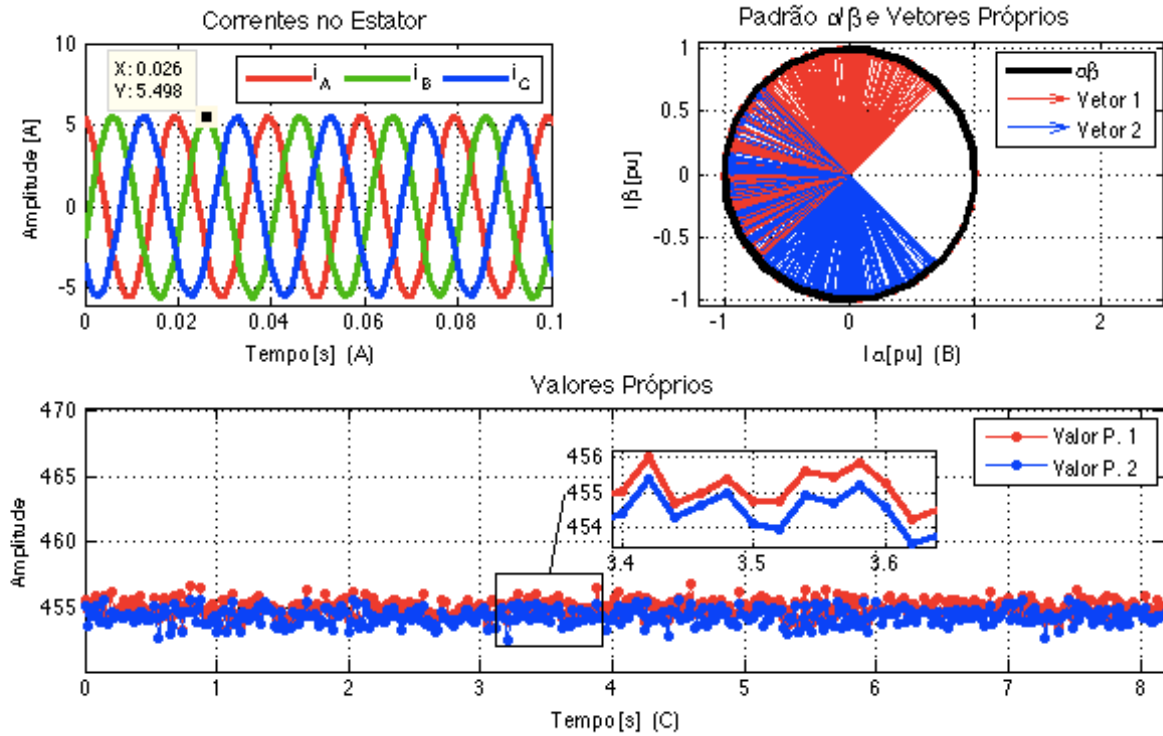


Figura 3.3 – Análise teórica do motor saudável em regime nominal (A) correntes no estator, (B) padrão  $\alpha\beta$  e vetores próprios e (C) valores próprios.

Os valores próprios obtidos (Figura 3.3-C) apresentam valor idêntico e praticamente invariante no tempo, isto porque, os dados em análise não apresentam uma variação segundo uma direção preferencial, pois estão muito pouco correlacionados. Assim sendo e, como espectável, verifica-se que os vetores próprios variam de direção a cada ciclo/período de cálculo da PCA.

Deste modo é possível concluir que o vetor  $\alpha\beta$  assume a forma característica de um motor sem falhas, a de um círculo.

### 3.2.2. Motor com Falha no Estator

A simulação de um motor com falha no estator é feita multiplicando a resistência e indutância do enrolamento, de uma ou várias fases, por um fator entre 0 e 1 no respectivo campo da janela de configuração do modelo (Figura 3.2-B).

Aplicando um fator de 0.8 à fase A, ou seja, 20% do enrolamento desta fase está curto-circuitado, foi obtida a seguinte figura.

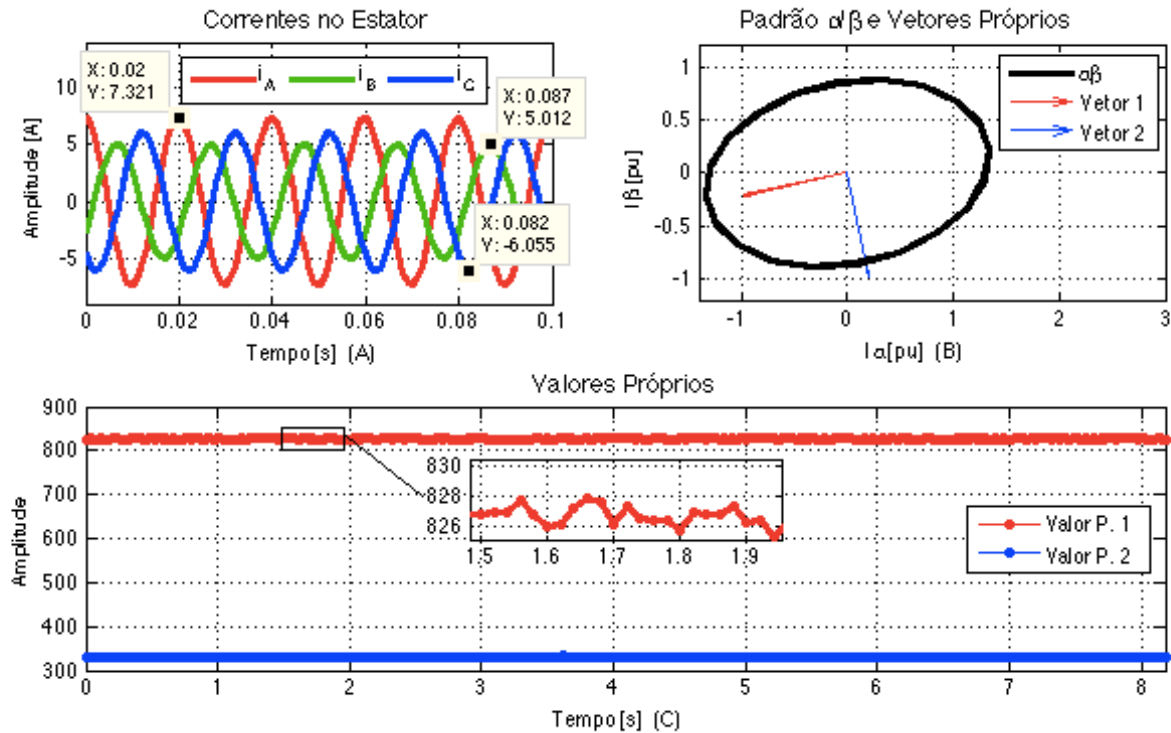


Figura 3.4 - Análise teórica do motor em regime nominal com 20% do enrolamento da fase A do estator curto-circuitado (A) correntes no estator, (B) padrão  $\alpha\beta$  e vetores próprios e (C) valores próprios.

Neste caso, os valores próprios apesar de serem praticamente constantes ao longo do tempo, apresentam diferentes amplitudes, existindo uma distância fixa que os separa. Esta diferença indica que a maior variação das correntes  $\alpha\beta$  acontece segundo o vetor com maior valor próprio, representado como 'Vetor 1' da Figura 3.4-B. Uma vez que durante o ensaio, os sucessivos vetores principais apontam na mesma direção, torna-se possível concluir que o vetor  $\alpha\beta$  assume a forma característica de um motor com falha no estator, a de uma elipse.

A elipse obtida na Figura 3.4-B, sofre rotações de acordo com a fase do enrolamento danificado, como mostra a figura seguinte, onde, recorrendo ao modelo foi alterada a fase com falha.



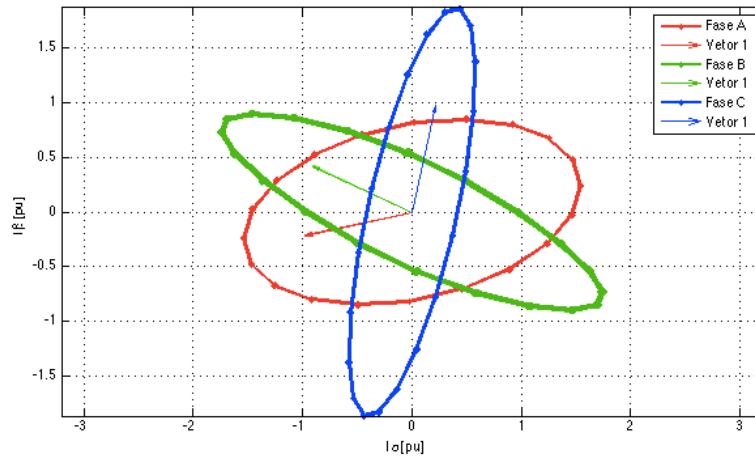


Figura 3.5 – Padrão descrito pelo vetor  $\alpha\beta$  para falhas no enrolamento de diferentes fases do estator.

A figura acima demonstra que a fase afetada é identificável pelo quadrante onde está localizado o vetor próprio principal:

- Fase A – 3º quadrante;
- Fase B – 2º quadrante;
- Fase C – 1º quadrante.

O aumento da gravidade da falha no estator (FE), provoca um proporcional aumento da excentricidade da elipse [96], como mostra a Figura 3.6, obtida para situações desde a ausência de falha até um curto-circuito em 30% do enrolamento da fase A.

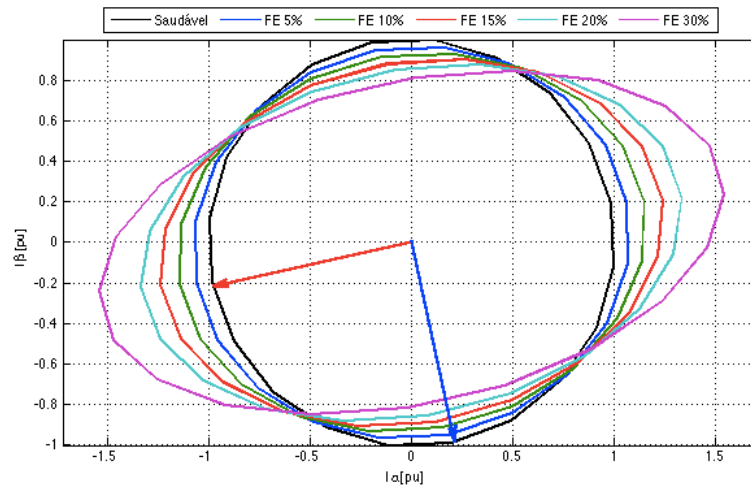


Figura 3.6 – Evolução da excentricidade da elipse para diferentes percentagens de enrolamento do estator curto-circuitado, em funcionamento nominal.

Este aumento da excentricidade da elipse, desenhada a partir do vetor de correntes  $\alpha\beta$ , torna possível associar um índice de severidade da falha, recorrendo à PCA. Como referido na Secção 3.1, os valores próprios de uma matriz 2 por 2 representam o comprimento dos semieixos de uma elipse orientados segundo os vetores próprios. De modo a comparar a variação da excentricidade das duas elipses em causa, foi elaborada a seguinte figura.

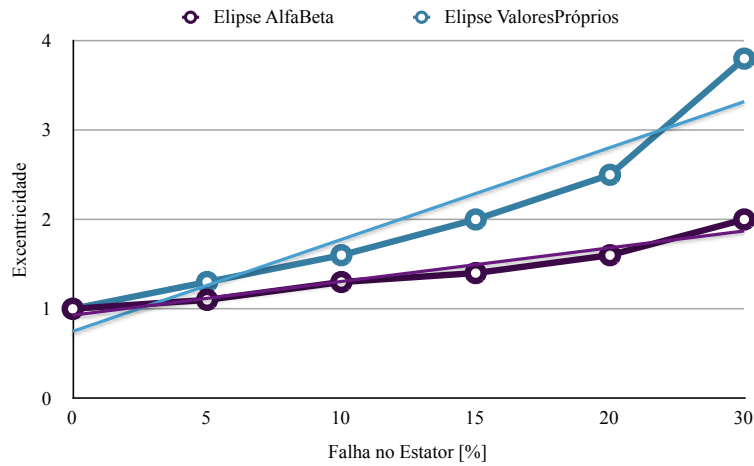


Figura 3.7 – Comportamento da excentricidade das elipses desenhadas a partir de padrão  $\alpha\beta$  e do resultado da PCA, com o aumento da gravidade da falha no estator, em funcionamento nominal.

Pela Figura 3.7 verifica-se a excentricidade da elipse desenhada pelo padrão  $\alpha\beta$  acompanha, como mencionado, de forma linear o aumento da gravidade da falha. Já a elipse com base na PCA, apresenta um comportamento ligeiramente não linear, passível de solucionar com o aumento do número de amostras de corrente alvo desta análise estatística.

Assim, a gravidade da falha pode ser dada por um índice de severidade baseado na excentricidade da elipse referida anteriormente [97], dado por,

$$IS_{estator} = 100 \cdot \left[ 1 - \frac{(\lambda_2)_{médio}}{(\lambda_1)_{médio}} \right] \quad (3.9)$$

De notar que este índice tem como objetivo fornecer uma noção da gravidade da falha, não correspondendo a uma percentagem.

Para os casos com iguais percentagens de enrolamento curto-circuitado, foram aplicados vários binários de carga de modo a verificar o comportamento deste índice.

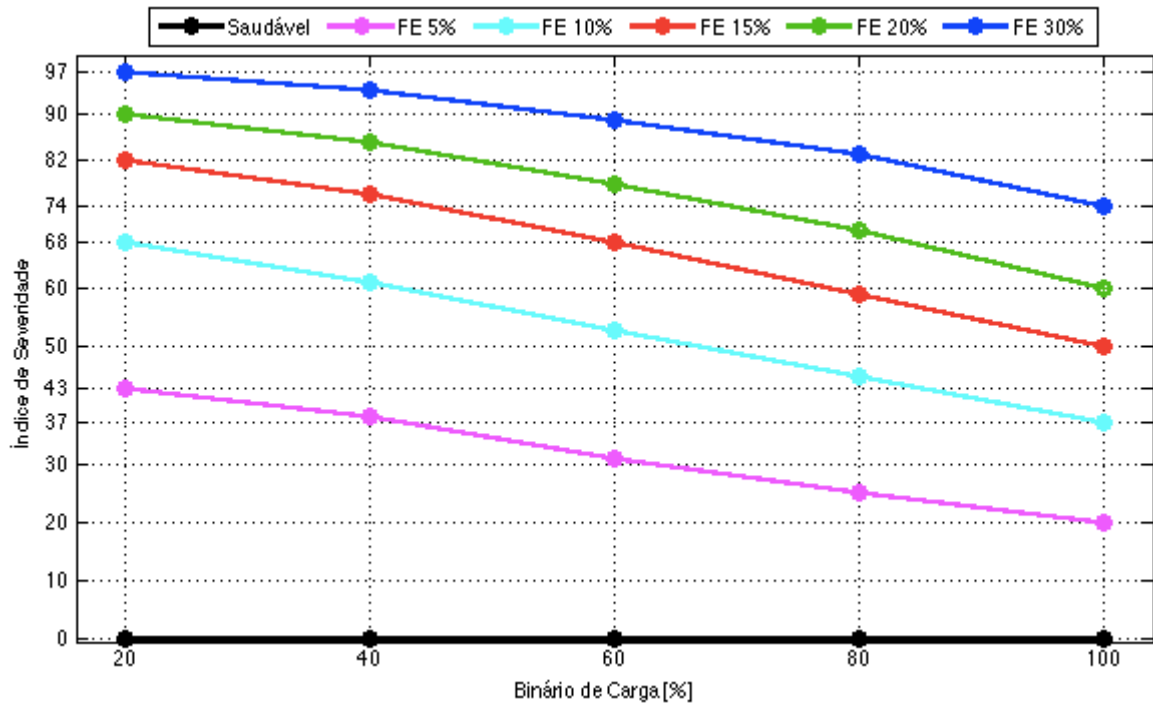


Figura 3.8 – Índice de severidade para diferentes percentagens de enrolamento do estator curto-circuitado e diferentes binários de carga.

Pela Figura 3.8 constata-se que para um certo binário de carga, o IS proposto fornece boa avaliação ainda que não seja completamente proporcional à gravidade da falha.

Fazendo variar o binário, o IS não é constante existindo um declive nas linhas da figura, uma vez que a excentricidade da elipse do padrão  $\alpha\beta$  diminui. O aumento do binário provoca uma notável diminuição dos IS.

De seguida, é apresentado um fluxograma que resume o método de deteção e diagnóstico de falha no estator através da PCA, implementado na TPU M220.

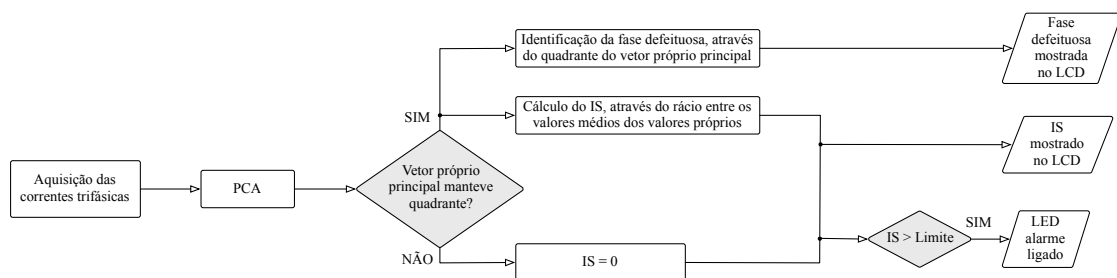


Figura 3.9 – Fluxograma do mecanismo de deteção e diagnóstico de falha no estator.

### 3.2.3. Motor com Falha no Rotor

Como referido, o modelo matemático utilizado nestas simulações diz respeito a um MITF com rotor bobinado, deste modo as falhas incidem sobre um enrolamento do mesmo.

A falha no rotor é simulada de modo análogo à provocada no estator, através de um fator multiplicativo entre 0 e 1 que altera a resistência e indutância do enrolamento de uma ou várias fases.

Impondo um fator de 0.5 ao enrolamento da fase A do rotor, ou seja, 50% encontra-se curto-circuitado, foram obtidas as seguintes correntes trifásicas de alimentação.

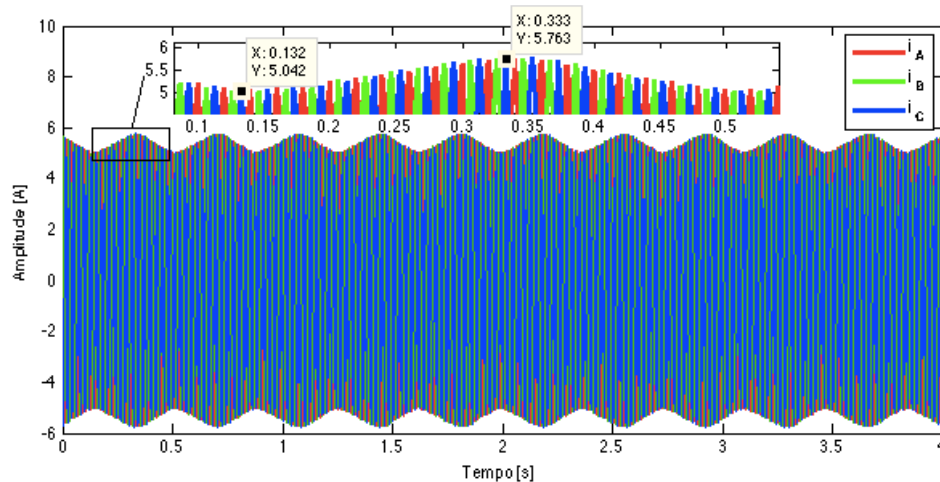


Figura 3.10 – Correntes no estator do motor em regime nominal, com 50% do enrolamento da fase A do rotor curto-circuitado.

Uma falha nos enrolamentos, e/ou nas barras do rotor quebradas, causa a modulação das correntes no estator, através de uma envolvente periódica baseada nos picos de amplitude das correntes [58], que provoca uma variação também periódica do binário e da velocidade de rotação [98].

Pela figura anterior verifica-se que a amplitude das três correntes não é constante, existindo um comportamento sinusoidal característico deste tipo de falhas e/ou na presença de excentricidades no rotor [99], [100]. Aplicando a transformada de Concordia, resulta um padrão  $\alpha\beta$  composto por vários círculos cujos raios dependem da amplitude de um período das correntes originárias, como referido no início deste capítulo. Deste modo, a forma de *donut* verificada (Figura 3.11-B) resulta do conjunto de vários círculos com raios diferentes.

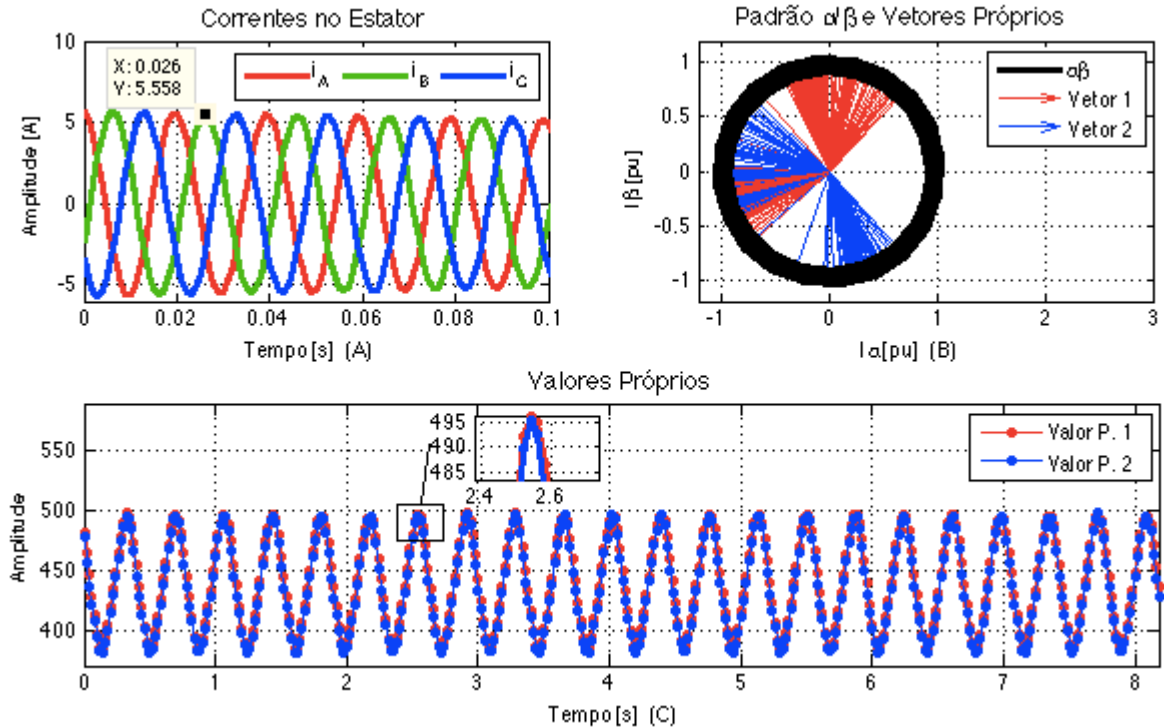


Figura 3.11 - Análise teórica do motor em regime nominal, com 50% do enrolamento da fase A do rotor curto-circuitado (A) correntes no estator, (B) padrão  $\alpha\beta$  e vetores próprios e (C) valores próprios.

Na Figura 3.11-C é visível que os valores próprios apesar de coincidentes não são constantes e apresentam uma variação ao longo do tempo, demonstrando um comportamento sinusoidal. Sendo estes coincidentes, significa que não existe uma direção fixa onde se verifique a maior variação do vetor de correntes  $\alpha\beta$ , sendo visível na Figura 3.11-B, onde os vetores próprios não assumem uma direção preferencial.

Sendo que a envolvente verificada neste tipo de falha varia de acordo com a gravidade da falha [58], torna-se necessário analisar a evolução do padrão descrito pelas correntes. Para este efeito a resistência e indutância de um enrolamento foi reduzida em 5%, 30% e 50%.

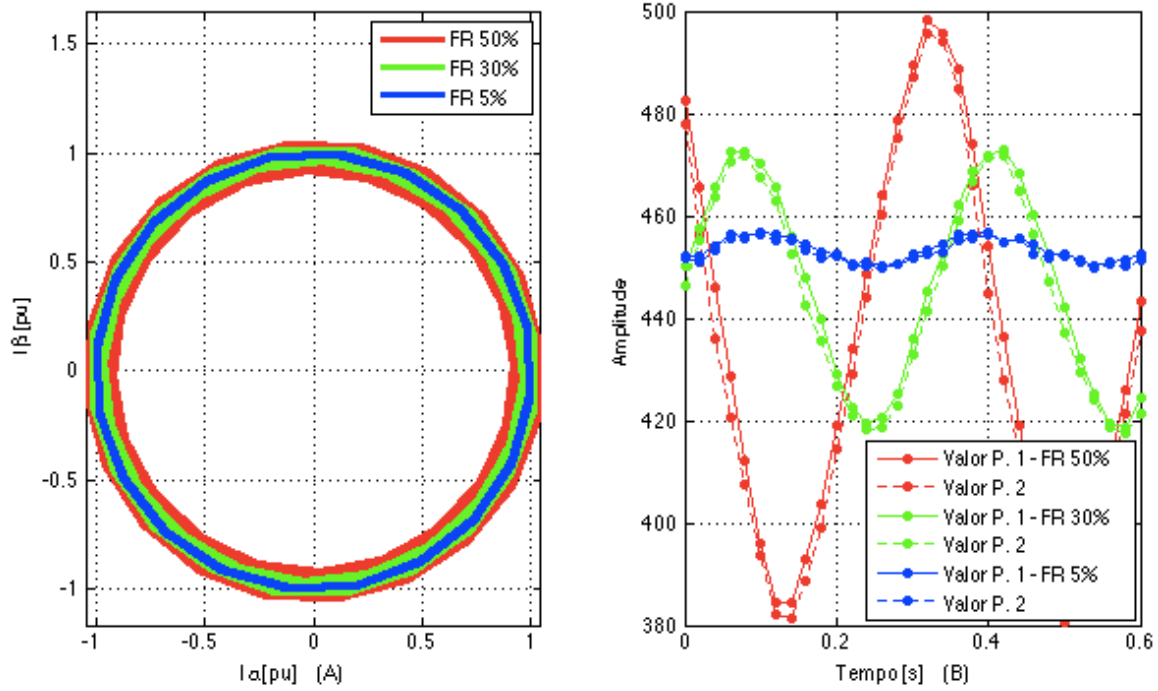


Figura 3.12 - Evolução do (A) padrão  $\alpha\beta$  e dos (B) valores próprios para diferentes percentagens de enrolamento do rotor curto-circuitado, em funcionamento nominal.

O aumento da gravidade da falha traduz-se num aumento da espessura do *donut* e um aumento da amplitude da sinusóide descrita pelos valores próprios [93]. Verificada esta relação, torna-se possível estabelecer um índice de severidade baseado na amplitude do valor próprio principal, adaptado de [101] dado por,

$$IS_{rotor} = 100 \cdot \left[ \frac{\max(\lambda_1) - \min(\lambda_1)}{\max(\lambda_1)} \right] \quad (3.10)$$

Este índice foi calculado para várias severidades da falha no rotor (FR) e vários binários de carga, tendo sido obtidos os valores representados graficamente na Figura 3.13.

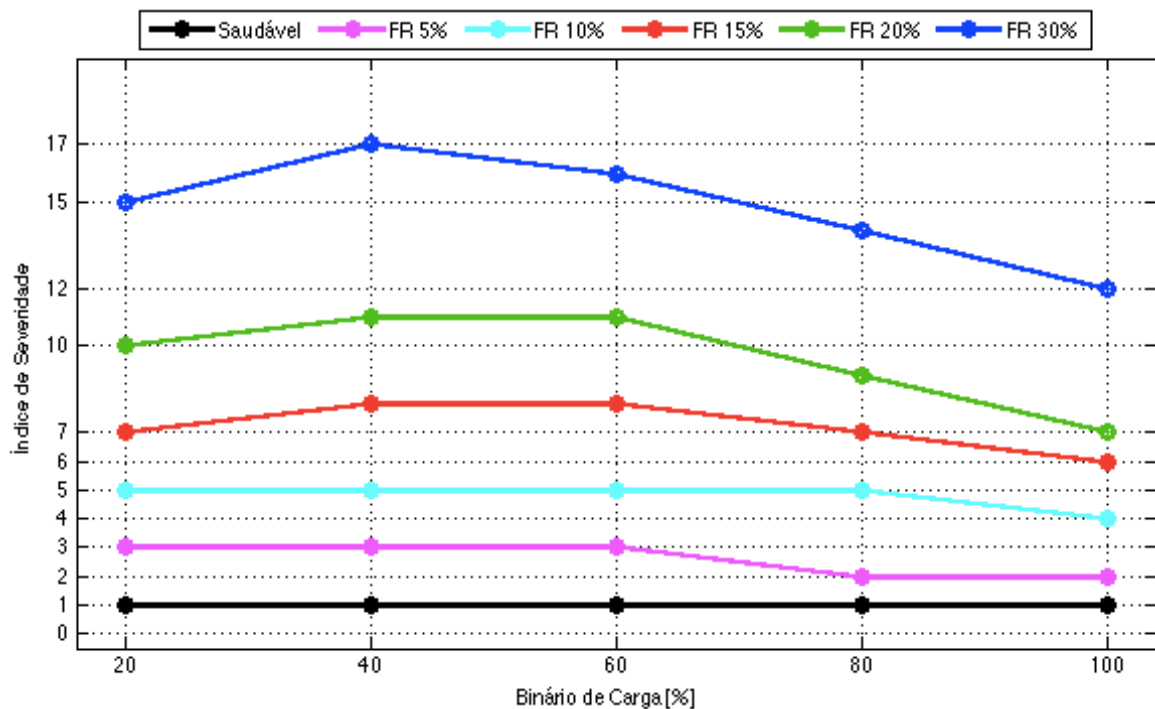


Figura 3.13 - Índice de severidade para diferentes percentagens de enrolamento do rotor curto-circuitado e diferentes binários de carga.

Pela Figura 3.13 verifica-se que para um certo binário de carga, o IS fornece uma avaliação proporcional à gravidade da falha.

Fazendo variar o binário constata-se que o IS não é constante, existindo um declive ainda que pouco acentuado, das linhas da figura, responsável por uma diminuição média dos IS na ordem dos 32%.

De seguida é apresentado um fluxograma que resume o método de deteção e diagnóstico de falha no rotor através da PCA, implementado na TPU M220.

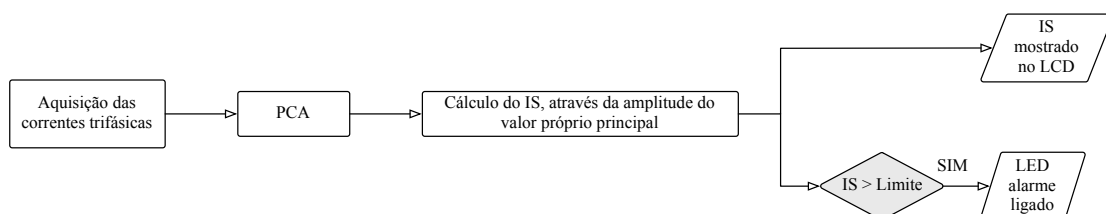


Figura 3.14 - Fluxograma do mecanismo de deteção e diagnóstico de falha no rotor.

### 3.2.4. Barras Quebradas

Aliado ao método baseado na análise de componentes principais, que faz uma avaliação da condição global do rotor, o SDDF implementado procura também detetar a presença de barras do rotor quebradas (BRQ), recorrendo a uma análise espectral das correntes de alimentação.

Como referido na Secção 2.3.2, a existência de barras quebradas provoca o aparecimento de frequências no espectro da corrente, dadas por,

$$f_{BRQ} = (1 \pm 2 \cdot k \cdot s) \cdot f \quad (3.11)$$

sendo  $f$  a frequência de alimentação,  $s$  o escorregamento e  $k = 1, 2, 3, \dots$ . De notar que a amplitude espectral destas frequências diminui com o aumento de  $k$ .

Assim, passam a existir frequências espelhadas em relação à fundamental denominadas por bandas laterais, esquerda e direita, que se afastam de acordo com o escorregamento.

Tendo em conta o carácter prático desta dissertação e na ausência de um modelo capaz de simular danos nas barras, a deteção deste tipo de falha foi implementada recorrendo a dados experimentais de motores, onde artificialmente foram perfuradas 2 barras num caso e 9 no outro, como é descrito na Secção 5.2.

Deste modo, a unidade TPU M220 foi programada com vista à recolha das correntes trifásicas de alimentação dos motores.

Assim, foram adquiridas correntes de motores com 2 e 9 BRQ, aplicando diferentes binários de carga, e através de um transdutor ótico, foi obtida uma velocidade de 2938 RPM e 2810 RPM respetivamente. Sendo motores com um par de pólos, as velocidades obtidas equivalem a um escorregamento de 2,08% e 6,35% respetivamente.

De seguida são apresentadas as correntes recolhidas pela TPU M220 e o espectro das mesmas, recorrendo ao Matlab<sup>®</sup>.



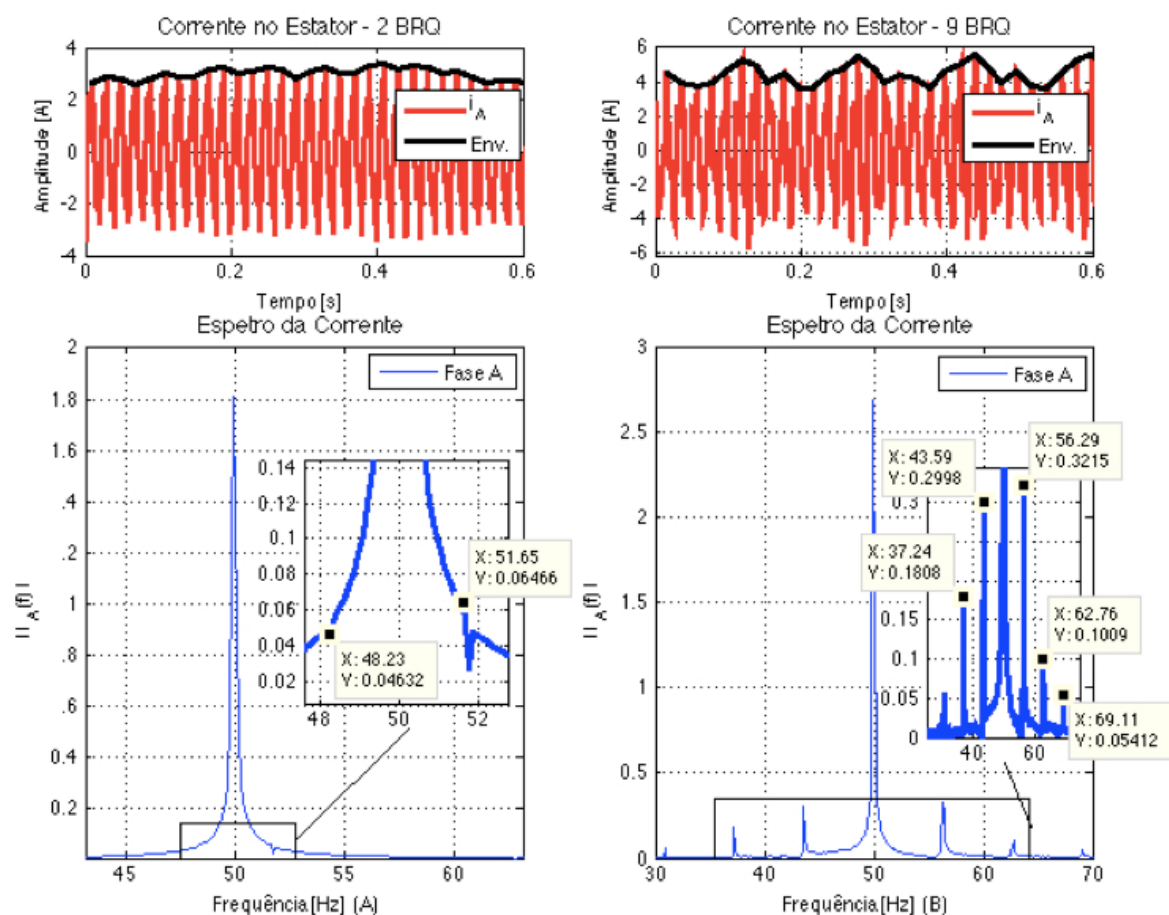


Figura 3.15 – Espetro da corrente dos motores com (A) 2 BRQ (B) 9 BRQ.

Pela figura verifica-se que a envolvente desenhada a partir dos picos das amplitudes, apresenta um comportamento sinusoidal característico deste tipo de falha, tal como sucede no caso do rotor bobinado, analisado anteriormente.

Recorrendo à equação (3.11) e com base nos valores de escorregamento verificados, é expectável que devido à existência de barras quebradas existam frequências de acordo com a tabela seguinte.

Tabela 3.1 - Cálculo analítico das frequências características através da corrente.

	k	Frequências características [Hz]	
		Motor com 2 BRQ	Motor com 9 BRQ
Banda lateral esquerda	1	47.92	43.65
	2	45.84	37.30
Banda lateral direita	1	52.08	56.35
	2	54.16	62.70

Para o caso do motor com 9 BRQ, as frequências obtidas na Figura 3.15-B coincidem com as calculadas analiticamente e presentes na Tabela 3.1, embora se verifique uma diferença desprezável, devido à resolução da FFT. Quanto ao motor com 2 BRQ, as frequências da tabela não são visíveis no respetivo espectro da Figura 3.15-A devido à baixa gravidade da falha, e ao reduzido escorregamento do motor, que leva à proximidade da frequência com a fundamental, impossibilitando a sua identificação [102].

Por outro lado, embora uma normalização do espectro seja vantajosa para destacar pequenas variações de amplitude, no caso da análise espectral do motor com 2 BRQ, não se verificam benefícios. Assim, e devido ao significativo cálculo computacional necessário, esta normalização não foi aplicada.

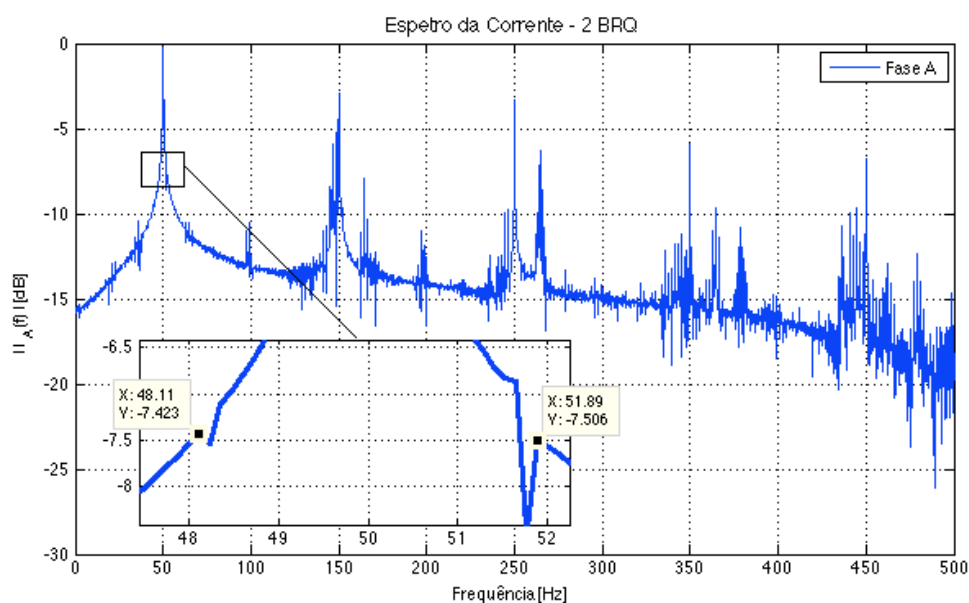


Figura 3.16 – Espectro de magnitude da corrente no motor com 2 BRQ.

Ainda que uma ferramenta de computação numérica (e.g. Matlab<sup>®</sup>), capaz de analisar o espectro da corrente por parte de um operador, torne intuitiva a identificação das frequências características de barra(s) quebrada(s), a automatização deste processo torna-se uma tarefa complexa devido:

- Necessidade de estimar a velocidade/escorregamento, na inexistência de um mecanismo de medição;
- Possível mascaramento das frequências da falha com a da rede elétrica, no caso do motor apresentar baixo escorregamento;
- Impossibilidade de deteção/diagnóstico da falha, quando apresente baixo nível de severidade (Figura 3.15-B).

O SDDF desenvolvido procura ultrapassar estes problemas, de modo a permitir que sejam detetadas e diagnosticadas barras do rotor quebradas, de forma autónoma e em tempo real. Para o conseguir, é adotada uma abordagem similar ao método da potência instantânea (Secção 2.3.2), que introduz novas frequências relacionadas com a falha numa banda afastada da fundamental possibilitando a sua deteção, embora seja necessário adquirir correntes e também tensões.

O método utilizado, denominado por análise do espectro do quadrado da corrente, tem a vantagem de necessitar apenas da corrente de uma fase, mantendo as vantagens mencionadas no parágrafo anterior [103].

Com o quadrado da corrente, a equação (3.11) deixa de ser válida, sendo que a frequência fundamental  $f$  é deslocada para  $2 \cdot f$  e as características de barras quebradas passam a ser dadas por [103],

$$f_{BRQ_{quadrado}} = (1 \pm k \cdot s) \cdot 2 \cdot f \quad (3.12)$$

e por,

$$f_{BRQ_{quadrado}} = 2 \cdot k \cdot s \cdot f \quad (3.13)$$

sendo  $f$  a frequência de alimentação,  $s$  o escorregamento e  $k = 1, 2, 3, \dots$

A primeira equação (3.12) não trás vantagens uma vez que indica novamente as frequências nas bandas laterais, esquerda e direita, em relação à fundamental. É com base na equação (3.13) que o SDDF desenvolvido se baseia, uma vez que indica a frequência dos novos componentes introduzidos com o quadrado da corrente. Por outro lado, para  $k = 1$ , a amplitude da frequência  $2 \cdot s \cdot f$  é independente da inércia do motor, harmónicas da tensão de alimentação e da variação da carga do motor [69], sendo assim esta a frequência alvo de identificação.

Deste modo, recorrendo à equação (3.13) são obtidas analiticamente as frequências destes novos componentes, como mostra a tabela seguinte.

Tabela 3.2 – Frequências dos componentes introduzidos com o quadrado da corrente.

k	Frequências características [Hz]	
	Motor com 2 BRQ	Motor com 9 BRQ
1	2.08	6.35
2	4.16	12.70
3	6.24	19.05

Fazendo o cálculo do quadrado da corrente e posterior FFT, recorrendo ao Matlab® obtém-se a seguinte figura.

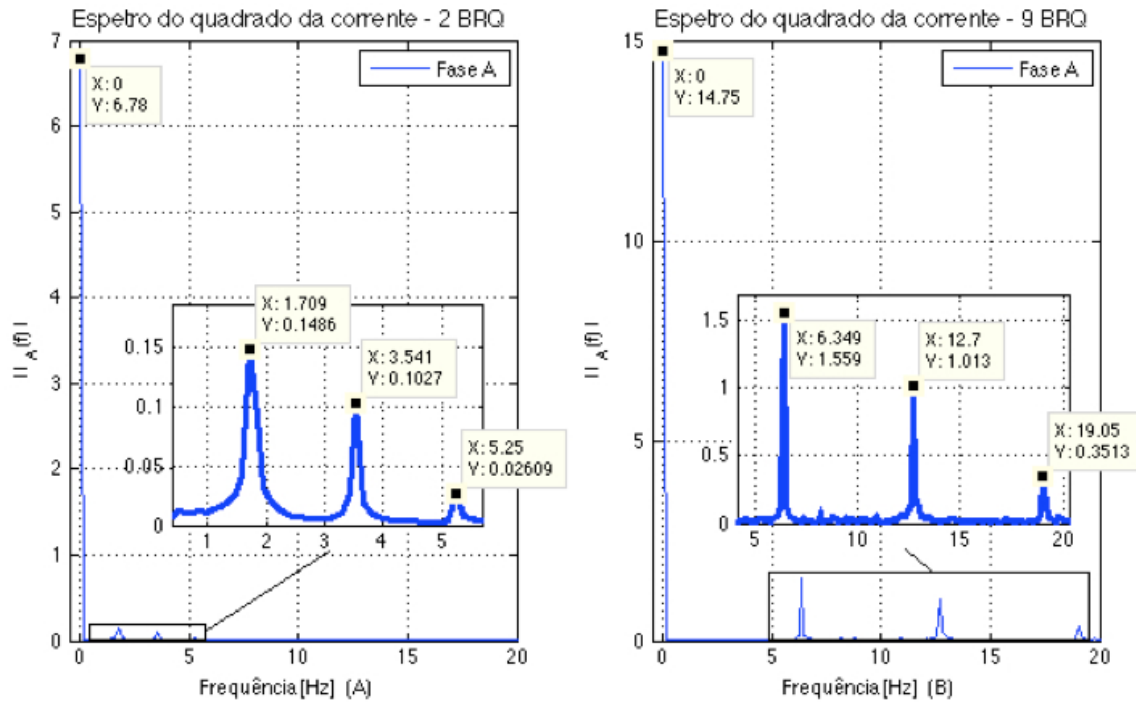


Figura 3.17 - Espectro do quadrado da corrente dos motores com (A) 2 BRQ e (B) 9 BRQ.

Uma vez que as amplitudes das frequências dadas por (3.13) diminuem com o aumento de  $k$ , a identificação da frequência  $2 \cdot s \cdot f$  passa a ser possível. Coincidindo esta com o valor do escorregamento, dado em percentagem, a sua identificação é feita através da procura pela maior amplitude num intervalo limitado pelo escorregamento nominal do motor, excluindo a componente contínua.

Relativamente ao diagnóstico da severidade da falha, este é feito com base na componente contínua ( $f = 0 \text{ Hz}$ ), introduzida com o quadrado da corrente sinusoidal. O índice de severidade é dado por [65],

$$IS_{BRQ} = \frac{|I_A^2(f = 100 \cdot s)|}{|I_A^2(f = 0)|} \quad (3.14)$$

De seguida é apresentado um fluxograma que resume o método de deteção e diagnóstico de falha(s) nas barras do rotor, com base no espectro do quadrado da corrente, implementado na TPU M220.

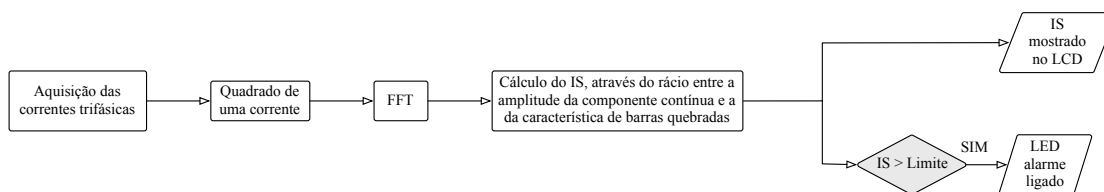


Figura 3.18 - Fluxograma do mecanismo de detecção e diagnóstico de falha nas barras do rotor.

A análise dos índices de severidade obtidos através deste método é feita em detalhe na Secção 5.6.

### 3.3. Verificação de Regime Estacionário

Dado que a amplitude do vetor de correntes  $\alpha\beta$  está diretamente relacionada com a amplitude das correntes trifásicas no estator, uma variação do binário de carga provoca uma alteração do padrão  $\alpha\beta$ . Assim, na existência de regimes transitórios devido a alterações no binário, o raio/eixo do padrão descrito muda de comprimento.

Como visto na Secção 3.1, a existência de falhas no rotor provoca de igual modo uma alteração do raio do círculo descrito, formando um *donut*.

Assim, numa variação do binário de carga durante a aquisição das correntes do estator, o SDDF pode detetar e diagnosticar uma falha inexistente. Por outro lado, dada a utilização da FFT, surge a necessidade de garantir que apenas sinais estacionários são alvo de diagnóstico.

Posto isto, foi efetuado uma simulação tendo sido, a cada 2 segundos, variado o binário de carga durante o intervalo de amostragem, como mostra a figura seguinte.

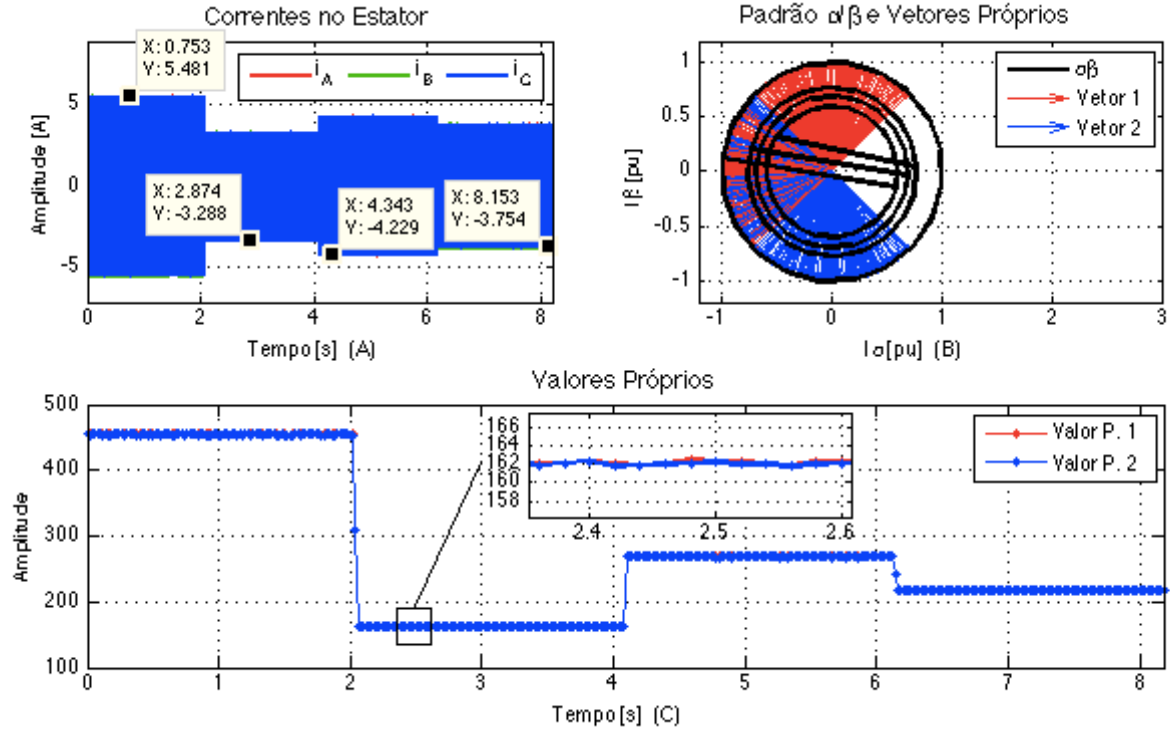


Figura 3.19 - Análise teórica do motor saudável ao ser variado o binário de carga (A) correntes no estator, (B) padrão  $\alpha\beta$  e vetores próprios e (C) valores próprios.

Os índices de severidade dados por (3.9) e (3.10) indicam:

$$IS_{estator} = 0$$

$$IS_{rotor} = 65$$

Como expectável, existe uma incorreta avaliação da condição do motor causada pela acentuada variação da amplitude dos valores próprios (Figura 3.19-C) no instante temporal em que se dá a alteração do binário de carga.

Posto isto, foi implementado um mecanismo para impedir que a deteção e diagnóstico de falhas seja efetuada em situações não estacionárias:

1. Efetua-se uma divisão do conjunto dos valores próprios calculados, por um determinado número  $n$  de intervalos, de iguais dimensões ( $int_1 \quad int_2 \quad \dots \quad int_n$ );
2. A cada intervalo é calculado o seu valor médio  $[(int_1)_{médio} \quad (int_2)_{médio} \quad \dots \quad (int_n)_{médio}]$ ;
3. Calcula-se a variância destes  $n$ 's valores médios;

Esta variância resultante permite avaliar o desvio do valor médio de cada conjunto face à média dos  $n$  conjuntos. Na tabela seguinte é possível verificar os valores de variância obtidos nas simulações anteriores.

Tabela 3.3 – Variância obtida nas simulações efetuadas.

	<b>Variância</b>
Motor saudável	0.004
Motor com 20% de Falha no Estator	0.008
Motor com 50% de Falha no Rotor	0.030
Motor saudável com binário variado	10300

Ao ser definido um valor máximo para esta variância, é possível ignorar intervalos de amostragem onde o binário apresente variações consideráveis.





## 4. Implementação

Este capítulo descreve a unidade TPU M220 onde foi implementado o sistema desenvolvido na dissertação, bem como as funcionalidade oferecidas por estas. É também apresentada a arquitetura do SDDF e o fluxograma que o descreve na sua totalidade.

### 4.1. TPU M220

Fabricada pela empresa EFACEC, a unidade terminal e de proteção TPU M220, pertence à família de relés digitais x220, destinada a realizar variadas funções desde proteção de linhas, proteção auxiliar e controlo de transformadores, bem como de geradores e motores de média/alta tensão.

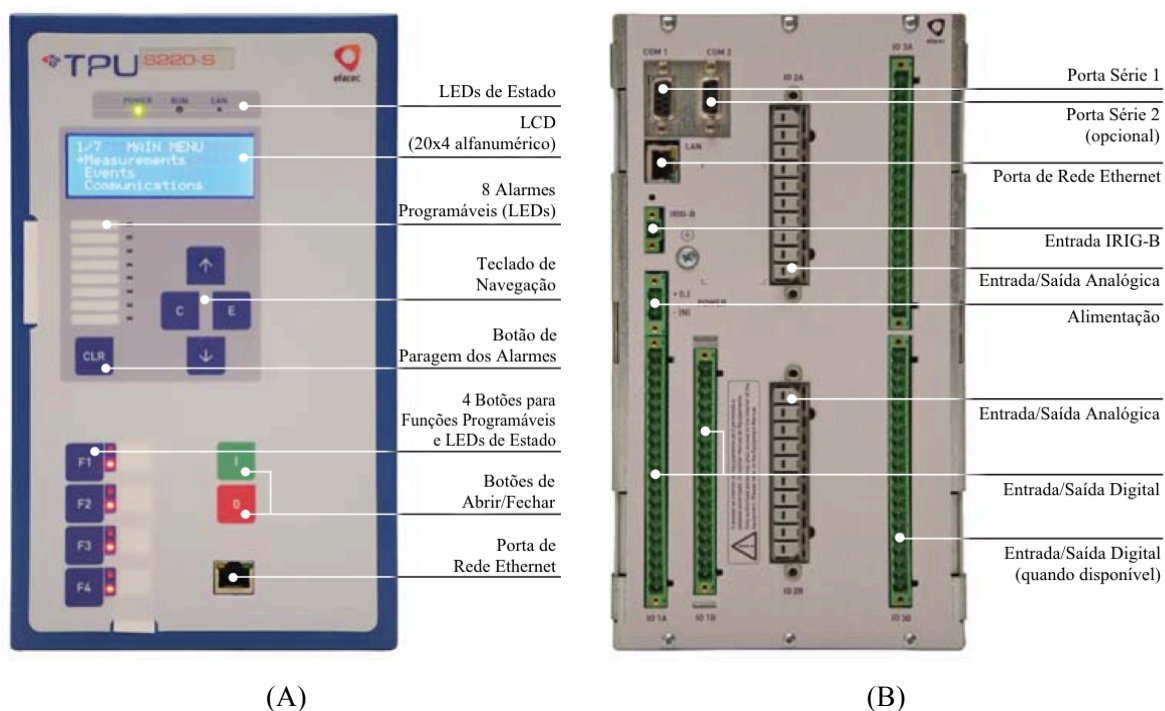


Figura 4.1 – Painel (A) frontal e (B) posterior da TPU.

Esta unidade oferece funções de proteção dos motores contra: sobrecorrente instantânea de fases, de terra e de sequência negativa, sub/sobretensão, sub/sobrefrequência, entre outros descritos em [104].

A TPU M220 possui um ecrã LCD alfanumérico e 8 LEDs programáveis de modo a fornecer toda a informação desejada bem como um teclado para navegação nas diversas funcionalidades e

configuração dos parâmetros necessários. Adicionalmente existem 4 botões, e respetivos LEDs de estado, para executar funções implementadas na unidade.

Aliada à interface local ilustrada na Figura 4.1, a TPU M220 oferece também a possibilidade de monitorização/controlo remoto através de servidor Web, estando disponíveis todas as funções existentes no dispositivo.

Esta unidade vem equipada com o processador de baixo custo OMAP-L138 da empresa *Texas Instruments*, que é formado por dois núcleos de modo a garantir um elevado desempenho,

- ARM926EJ-S, para uso genérico;
- TMS320C678, dedicado a operações de processamento de sinal (DSP).

A programação foi desenvolvida em C++ através de um ambiente integrado de desenvolvimento de programas denominado Code Composer Studio (CCS), da *Texas Instruments*. O CCS inclui aplicações necessárias como o *assembler*, o compilador e o *linker*, permitindo também depurar e analisar o código em tempo real [105].

Aliado à TPU M200 estão dois conjuntos de entradas e saídas analógicas para aquisição de tensões e/ou correntes, com frequência de amostragem de 1kHz, através de transformadores:

- De tensão, a operar numa escala de 100V, 110V, 115V e 120V;
- De intensidade, numa escala de 1A e 5A;

sendo possível alterar as escalas através de um interruptor presente no interior da TPU M220.

## **4.2. Arquitetura**

A TPU M220 oferece dois tipos de acesso: Utilizador e o Administrador.

O acesso como Administrador é feito com a introdução da respetiva palavra passe, dando privilégios de alteração das variáveis necessárias ao funcionamento do SDDF. De seguida é apresentado o diagrama de casos de uso relativamente aos parâmetros a configurar, por parte desta entidade.

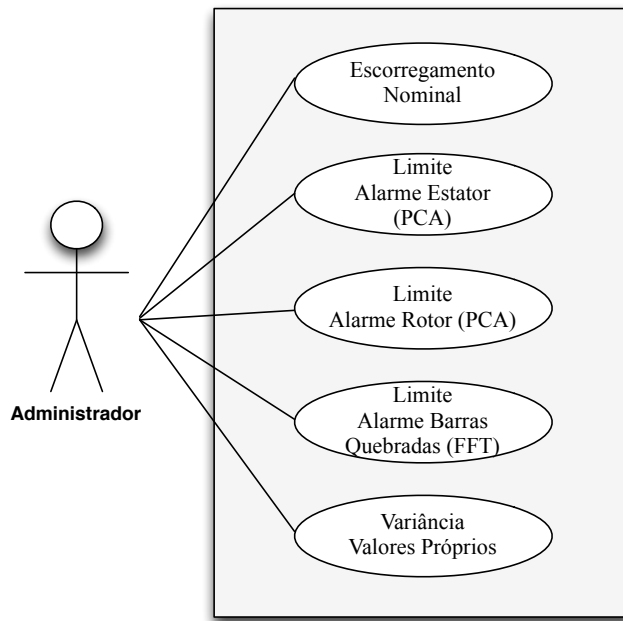


Figura 4.2 – Diagrama de casos de uso do Administrador.

Para que o SDDF faça uma avaliação coerente da condição do motor em análise, o Administrador necessita de configurar os seguinte parâmetros:

- ✓ **Escorregamento Nominal**, para definir o intervalo de procura da frequência característica das barras quebradas. Uma vez que o escorregamento aumenta para além do nominal no caso de existir um número significativo de barras danificadas, o intervalo máximo é definido pelo dobro do valor inserido;
- ✓ **Limite Alarme Estator (PCA)**, trata-se do valor do índice de severidade do estator a partir do qual é ligado o LED presente na TPU M220;
- ✓ **Limite Alarme Rotor (PCA)**, trata-se do valor do índice de severidade do rotor a partir do qual é ligado o LED presente na TPU M220;
- ✓ **Limite Alarme Barras Quebradas (FFT)**, trata-se do valor do índice de severidade das barras quebradas, calculado pela FFT, a partir do qual é ligado o LED presente na TPU M220;
- ✓ **Variância Valores Próprios**, diz respeito ao valor de variância máximo utilizado pelo mecanismo de verificação do regime estacionário.

Configurados estes campos, após ser pressionado o botão F1 presente no painel frontal, o SDDF elabora um relatório do estado do motor sendo este apresentado ao Utilizador, através do LCD existente no equipamento.

Deste modo, o Utilizador tem à sua disposição um diagnóstico visual de acordo com o seguinte diagrama de casos de usos.

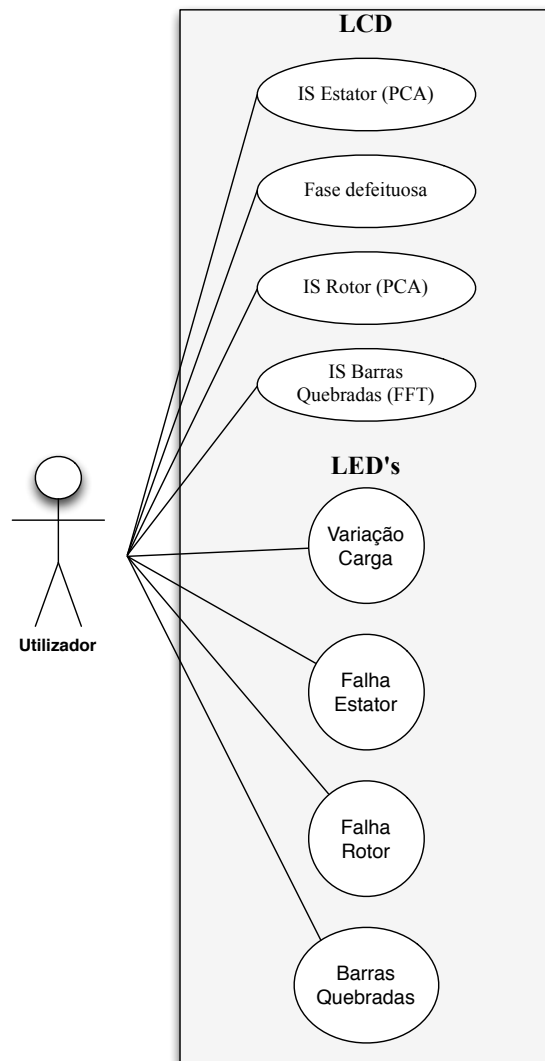


Figura 4.3 – Diagrama de caso de uso do Utilizador.

- ✓ **IS Estator (PCA)**, indica o índice de severidade da falha no estator;
- ✓ **Fase Defeituosa**, caso o índice anterior seja não nulo, este campo indica a fase afetada pela falha, numericamente;
- ✓ **IS Rotor (PCA)**, indica o índice de severidade da falha no rotor;
- ✓ **IS Barras Quebradas (FFT)**, indica o índice de severidade das barras do rotor quebradas;
- ✓ **LED Variação da Carga**, quando ligado indica que o mecanismo de deteção de verificação do regime estacionário detetou um alteração na carga aplicada ao motor. Neste caso as amostras de corrente recolhidas são ignoradas, sendo repetido o processo de amostragem;

- ✓ **LED Falha Estator**, informa o Utilizador da existência de falha a nível do estator;
- ✓ **LED Falha Rotor**, informa o Utilizador da existência de falha a nível do rotor;
- ✓ **LED Barras Quebradas**, informa o Utilizador da existência de danos a nível das barras do rotor.

A TPU M220 permite amostrar um sistema trifásico de correntes/tensões com uma frequência de amostragem equivalente a 1 kHz. Deste modo, e sendo a frequência da rede igual a 50 Hz, um período de sinusóide é definido por 20 amostras.

Uma vez que o SDDF faz uso da FFT, é necessário recolher um número de amostras que permita uma resolução do espectro que possibilite a identificação das frequências das falhas. Esta resolução, dada por,

$$Resolução_{FFT} = f_{amostragem} / n.^{\circ} amostras \quad (4.1)$$

é inversamente proporcional ao número total de amostras, sendo que quanto menor for o seu valor, melhor é a resolução da FFT. Assim existe um compromisso entre a resolução e o tempo dedicado à aquisição de amostras. A combinação que permite obter melhores resultados, relativamente à avaliação dos motores pelos índices de severidade, baseia-se em 8192 amostras o que implica uma aquisição durante 8.2 segundos. Embora tenham sido verificados diagnósticos semelhantes com metade do número de amostras, este foi mantido em 8192 para garantir as melhores avaliações da condição, permitindo assim uma resolução espectral de 0.12 Hz.

Para efetuar a FFT, foi utilizada uma biblioteca otimizada pela *Texas Instruments (DSPLib)*, que permite obter o espectro a partir de um vetor com N amostras, cuja dimensão tem de ser obrigatoriamente potência de 2, por questão de otimização.

Na TPU M220 as amostras obtidas pelo conversor analógico-digital são filtradas e armazenadas num *buffer* de 80 posições, através de uma operação independente ao SDDF desenvolvido. Deste modo, à medida que o *buffer* é preenchido, as amostras são copiadas até existir um vetor com as 8200 posições necessárias.

Sendo que o padrão  $\alpha\beta$ , analisado pela PCA, é desenhado com base num período sinusoidal, este é formado por 20 amostras. Deste modo, o vetor de 8200 amostras é percorrido segundo um mecanismo de janela deslizante, até serem obtidos os vetores e valores próprios correspondentes a 410 análises PCA, como ilustra a Figura 4.4.

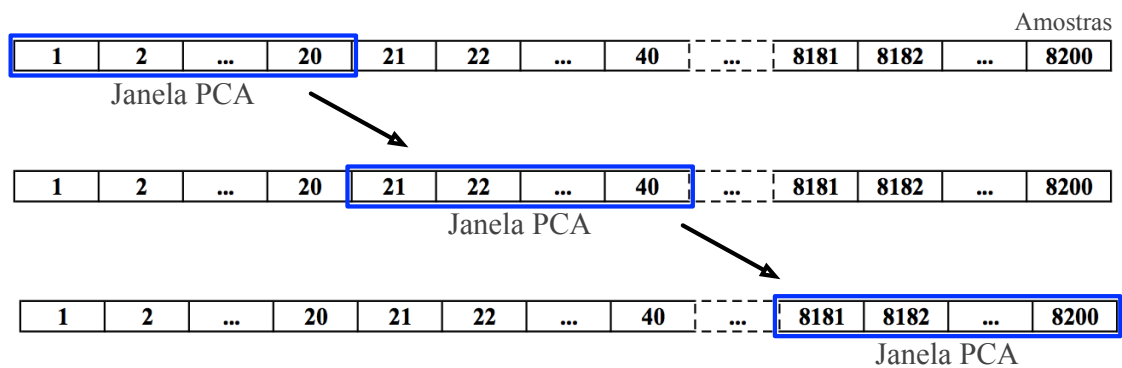


Figura 4.4 – Mecanismo de janela deslizante utilizado na análise PCA.

Obtidos os valores próprios é feita uma verificação do regime estacionário, tendo sido definidos 5 intervalos de iguais dimensões, onde foram calculadas as médias dos 82 valores próprios principais pertencentes a cada intervalo. Após este processo, é calculada a variância do conjunto definido pelas 5 médias obtidas. Caso a variância seja superior a 0.5, todas as 8200 amostras adquiridas são dadas como inválidas para deteção e diagnóstico de falha(s), sendo por isso rejeitadas, dando início a um novo processo de aquisição das correntes.

No sentido de aproveitar os cálculos resultantes do mecanismo mencionado, é feita uma seleção do intervalo cujo valor médio se encontra mais próximo do médio da totalidade dos intervalos. É com base nas amostras existentes neste intervalo que são calculados os índice de severidade, evitando, deste modo, que perturbações devido essencialmente a variações na carga, se reflitam na avaliação da condição do motor.

No Anexo A encontra-se o código Matlab<sup>®</sup> desenvolvido e implementando na TPU M220 em C++.



Caso os 410 vetores próprios principais, resultantes da análise PCA, estejam localizados num só quadrante é concluída a presença de falha nos enrolamentos do estator, sendo apresentado no LCD da unidade o índice de severidade com base na equação (3.9) e respetiva fase afetada. Caso se verifique alteração do quadrante é assumida a inexistência de falha, sendo apresentado um IS e fase da falha igual a 0.

Em relação ao rotor, são elaborados dois diagnósticos, um da sua condição geral e outro focado ao estado das barras que o constituem. O primeiro baseia-se na amplitude dos valores próprios principais, obtidos pela análise PCA, para fornecer um IS que é apresentado no LCD, com base na equação (3.10). O segundo recorre à FFT, de modo a ser obtido espectro não da corrente de uma fase, mas do quadrado do valor desta. Com esta particularidade torna-se possível identificar com bastante precisão a frequência que caracteriza a existência de danos nas barras do rotor. Com base no rácio entre a amplitude desta frequência e a da componente contínua obtida (equação (3.14)), é apresentado um IS no LCD existente na TPU M220.

O SDDF desenvolvido contempla também a ativação de alarmes através de 3 LED's, presentes no painel frontal da unidade. Com estes, e tendo sido configurados os limites dos IS a partir dos quais são acionados, passa a existir uma forma de alertar qualquer operador da existência de falha, sem necessidade de analisar os respetivos índices.



## 5. Resultados Experimentais

Neste capítulo é feita uma avaliação do sistema de detecção e diagnóstico desenvolvido, quando aplicado a motores, onde artificialmente são provocadas e conjugadas diversas falhas. Estes motores são também testados sob diversos níveis de carga, no sentido de verificar um grande número de situações passíveis de existir a nível industrial.

### 5.1. Montagem

Ao longo da preparação desta dissertação foi instalada uma bancada de testes com todo o equipamento necessário para verificar o comportamento do SDDF em tempo real, como mostra a Figura 5.1.

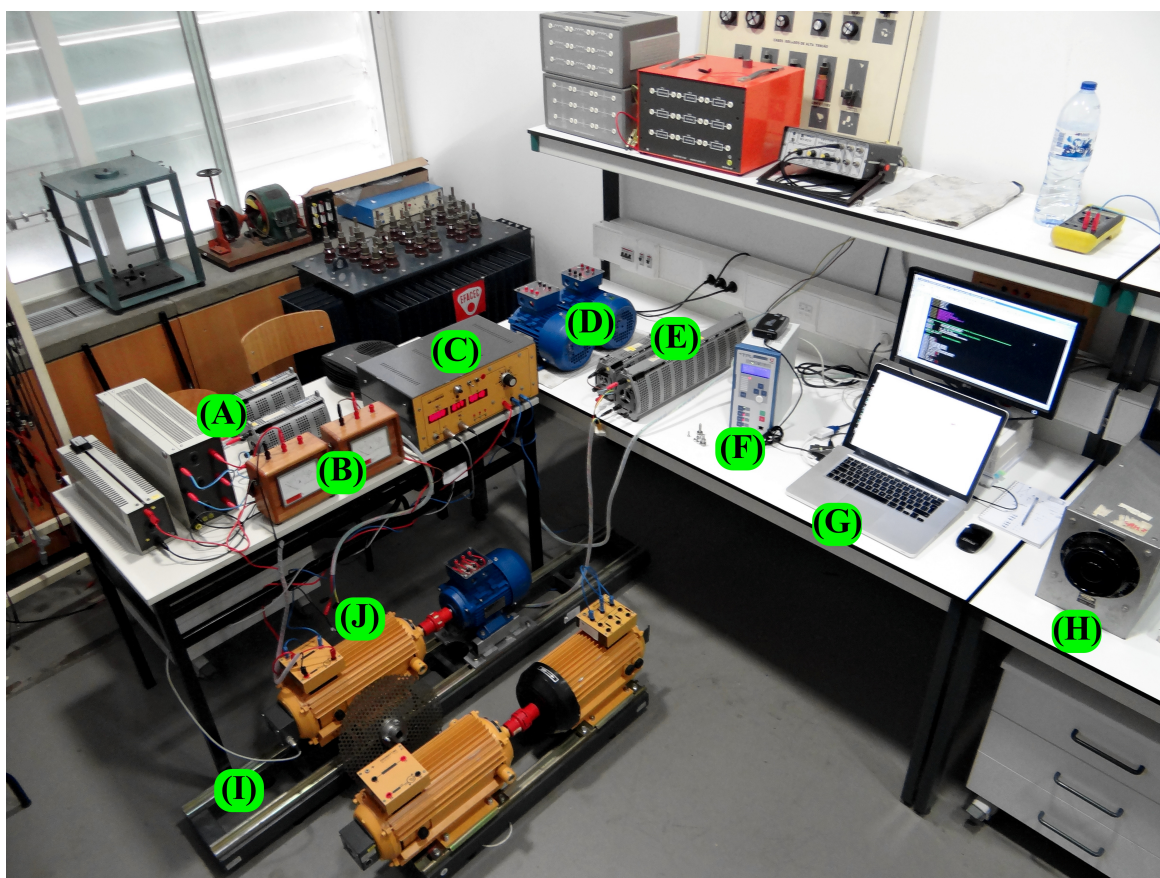


Figura 5.1 – Montagem experimental.

Pelas letras presentes na figura torna-se possível identificar o material utilizado:

- (A) Resistências de carga, aplicadas ao gerador;
- (B) Amperímetro/voltímetro, para verificar correntes/tensões no motor e gerador;
- (C) Unidade de medição do binário/potência, velocidade do motor e controlo da excitação do gerador;
- (D) Motores de indução trifásicos;
- (E) Resistências para provocar desequilíbrios nas fases do estator;
- (F) Unidade TPU M220, responsável pela execução do SDDF;
- (G) PC;
- (H) Autotransformador de 0 – 415 V;
- (I) Suporte para ensaio de motores;
- (J) Gerador DC.

O autotransformador utilizado permite variar a tensão de alimentação do MITF de 0 a 415 V.

De modo a amostrar as correntes de alimentação do motor, em série encontra-se ligada a unidade TPU M220, através de um bloco de terminais, como mostra a Figura 5.2.

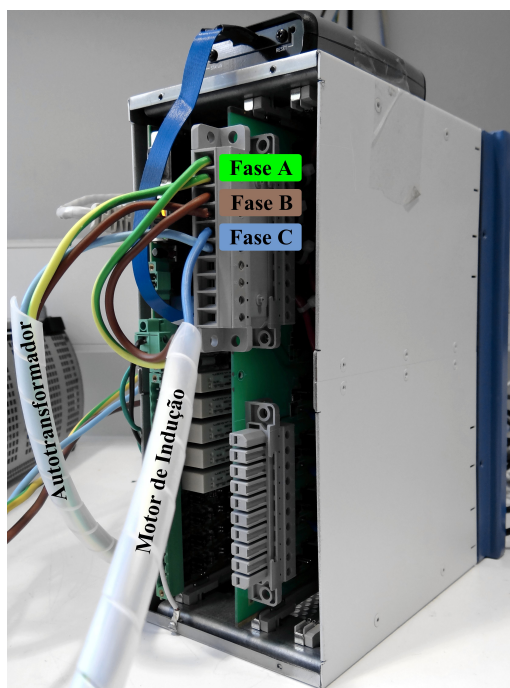


Figura 5.2 – Ligações trifásicas na TPU M220.

Os testes laboratoriais incidem sob três motores de indução trifásicos, da marca Guanglu e cujos terminais foram alterados de modo a tornar a ligação mais segura (Figura 5.3-A).

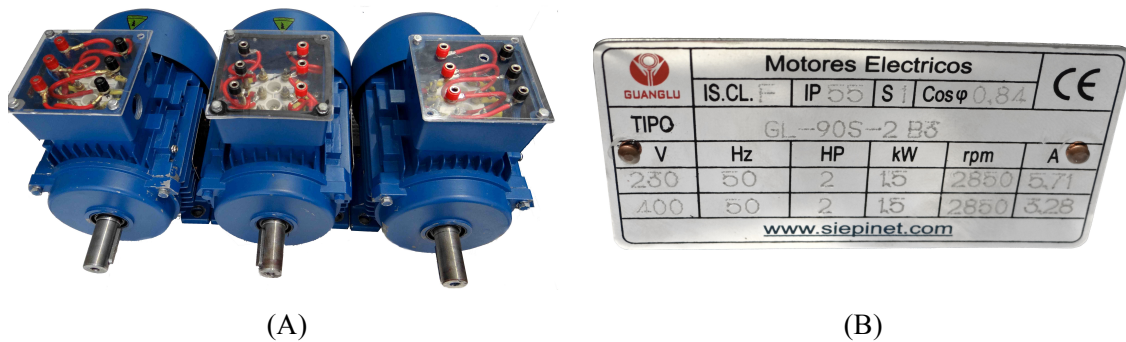


Figura 5.3 – Motores trifásicos utilizados com (A) terminais de alimentação alterados e (B) chapa de características.

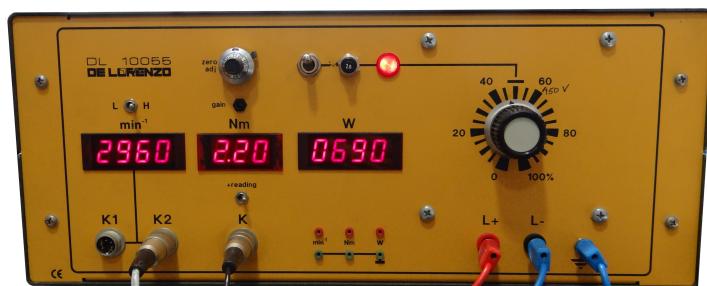
Tratam-se de motores de baixo custo com um par de pólos, sendo alimentados segundo uma configuração em triângulo com potência, tensão e corrente nominal igual a 1.5 kW, 230/400 V e 3.28/5.71 A, respetivamente. Nestes foram provocadas falhas similares às simuladas na Secção 3.2, através do modelo matemático.

Acoplado ao veio do MITF encontra-se um gerador de corrente contínua, da marca *De Lorenzo*, modelo DL 1025, de 0.75 kW, com a chapa de características ilustrada na Figura 5.4-B.



Figura 5.4 – (A) Gerador De Lorenzo 1025 e (B) chapa de características.

De modo a testar os motores de indução sob diversos binários de carga, é variada a corrente de excitação do gerador através de uma unidade (De Lorenzo 10055) equipada com uma fonte variável de corrente contínua, ilustrada na Figura 5.5-A. Esta unidade também permite visualizar o binário/potência desenvolvido bem como a velocidade de rotação instantânea do motor, através de transdutor ótico já existente no gerador (Figura 5.5-B).



(A)



(B)

Figura 5.5 – (A) Unidade medição/controlo da marca De Lorenzo, modelo DL 10050, e (B) transdutor ótico presente no gerador.

Nos respetivos ensaios o valor da velocidade obtido pela unidade foi confirmado recorrendo ao estroboscópio digital SF-9211, da marca americana Pasco, ilustrado na Figura 5.6.



Figura 5.6 – Estroboscópio utilizado.

## 5.2. Falhas Provocadas

A falha no estator foi provocada através da introdução de resistências variáveis em série com os enrolamentos do estator. Trata-se de uma aproximação aceitável, visto que em simulação foi alterada a resistência e indutância de cada enrolamento, embora desta forma os enrolamentos não são danificados permitindo futuros testes com estes motores.

Deste modo, foram necessárias duas resistências variáveis de  $12\ \Omega/10\ A$ , para aumentar a resistência de dois enrolamentos passando a existir um enrolamento com resistência inferior, simulando assim um curto-circuito neste último (Figura 5.7).



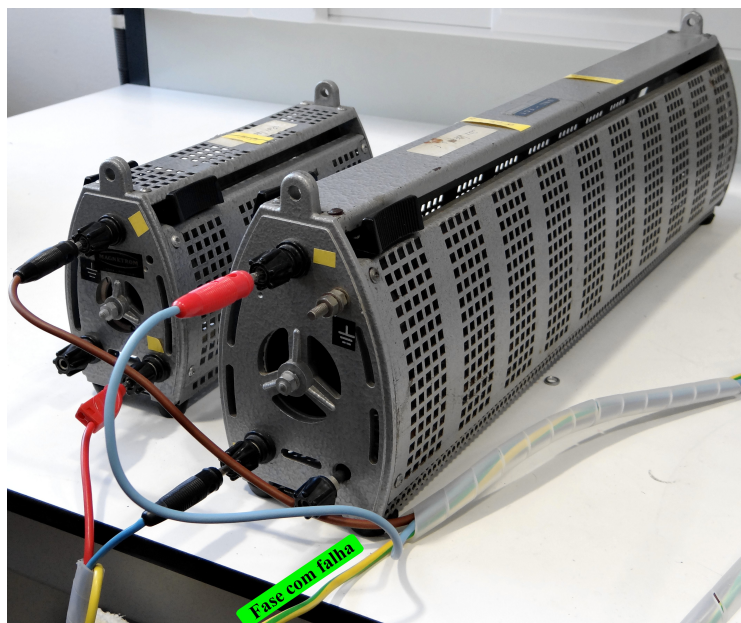


Figura 5.7 – Falha num enrolamento do estator.

A falha no rotor foi provocada de duas formas: danificando um conjunto de barras do rotor e recorrendo a um disco com pesos acoplados.

Com um berbequim foram perfuradas várias barras, de modo a impedir a passagem de corrente por estas. O resultado deste procedimento, efetuado previamente no seguimento de uma outra dissertação, está representado na figura seguinte.



Figura 5.8 – Falha no rotor devido a barras furadas.

Por outro lado, de modo a artificialmente serem provocadas excentricidades no rotor, foi acoplado ao veio um disco perfurado que permite a colocação de pesos na sua periferia. Assim, foram criados os eixos de encaixe no veio para elevar ambos os motores, de modo a impedir um embate nas calhas de suporte, resultando no ilustrado na Figura 5.9.

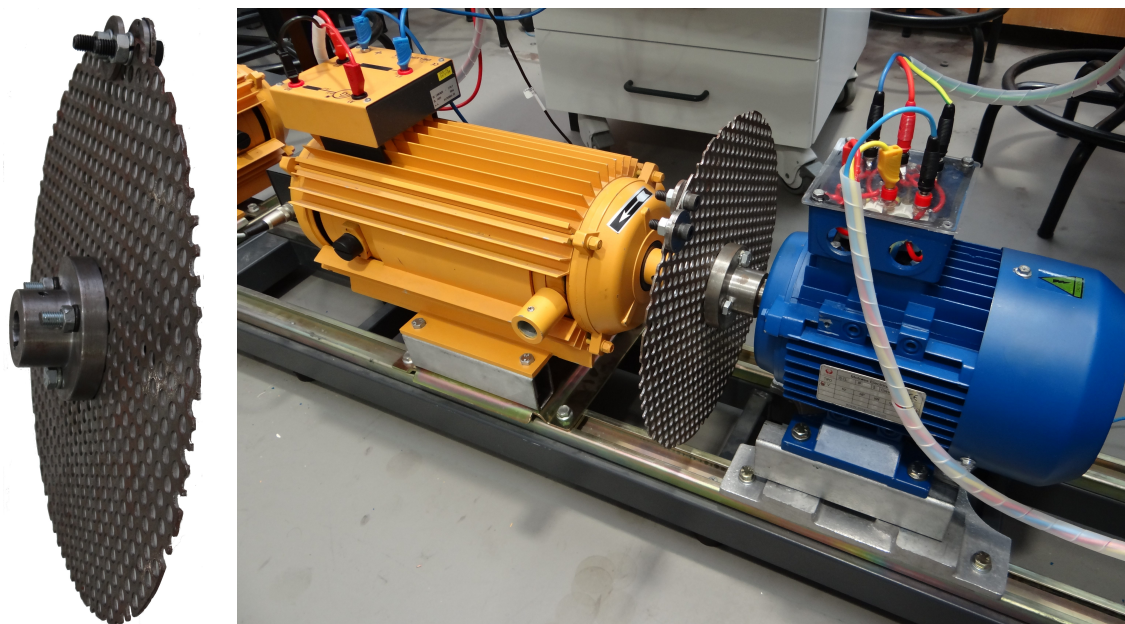


Figura 5.9 – Falha no rotor devido excentricidades provocadas por disco com pesos na periferia.

### 5.3. Metodologia

De modo a comprovar o desempenho do SDDF desenvolvido e implementado na TPU M220, foram efetuados testes nos três motores, sob diversas condições de funcionamento.

Na ausência de equipamento capaz de aplicar a carga nominal nos motores (e.g. travão eletromagnético), os mesmos foram testados até 73% do seu regime nominal tendo existido uma sobrecarga do gerador DC.

Regulando a corrente de excitação, através da fonte variável e respetiva configuração do banco de resistências variáveis ligado na saída do gerador, foi possível alterar o binário de carga aplicado aos motores. Deste modo, foram testados nos seguintes níveis de potência, 700 W, 800 W, 900 W, 1000 W e 1100 W que equivalem, respetivamente, a 47%, 53%, 60%, 67% e 73% da potência do motor. Foram ainda testados em vazio mecânico, tendo sido desacoplado o gerador DC.

Para verificar o comportamento do SDDF, foram também provocadas situações de múltiplas falhas. A tabela seguinte resume os ensaios efetuados.

Tabela 5.1 – Lista dos ensaios realizados.

	Sem falha adicional	Falha nos enrolamentos do estator	Excentricidades
<b>Motor Saudável</b>	✓	✓	✓
<b>Motor com 2 BRQ</b>	✓	✓	–
<b>Motor com 9 BRQ</b>	✓	–	–

Através do equipamento para depuração *JTAG XDS510*, fabricado pela empresa americana Spectrum Digital, ilustrado na Figura 5.10, torna-se possível adquirir por USB as variáveis afetadas pelo SDDF de modo a ser possível uma análise posterior.



Figura 5.10 – Equipamento *JTAG XDS510*, utilizado para depuração.

Os resultados apresentados nas secções seguinte correspondem aos ensaios mencionados na Tabela 5.1, obtidos pela unidade TPU M220, através das correntes de alimentação dos motores ensaiados. Assim, toda a informação apresentada de seguida tem origem exclusivamente na TPU M220, tendo sido utilizado o Matlab® apenas para representações gráficas dos dados que o SDDF faz uso para avaliar a condição do motor de indução trifásico. Aliado às representações dos dados de cada ensaio, está presente uma tabela com a informação apresentada ao utilizador através do LCD existente na unidade.

#### 5.4. Motor Saudável

Passado o regime transitório, os valores recolhidos pela TPU M220 a partir das correntes do motor saudável, permitem construir a seguinte figura.

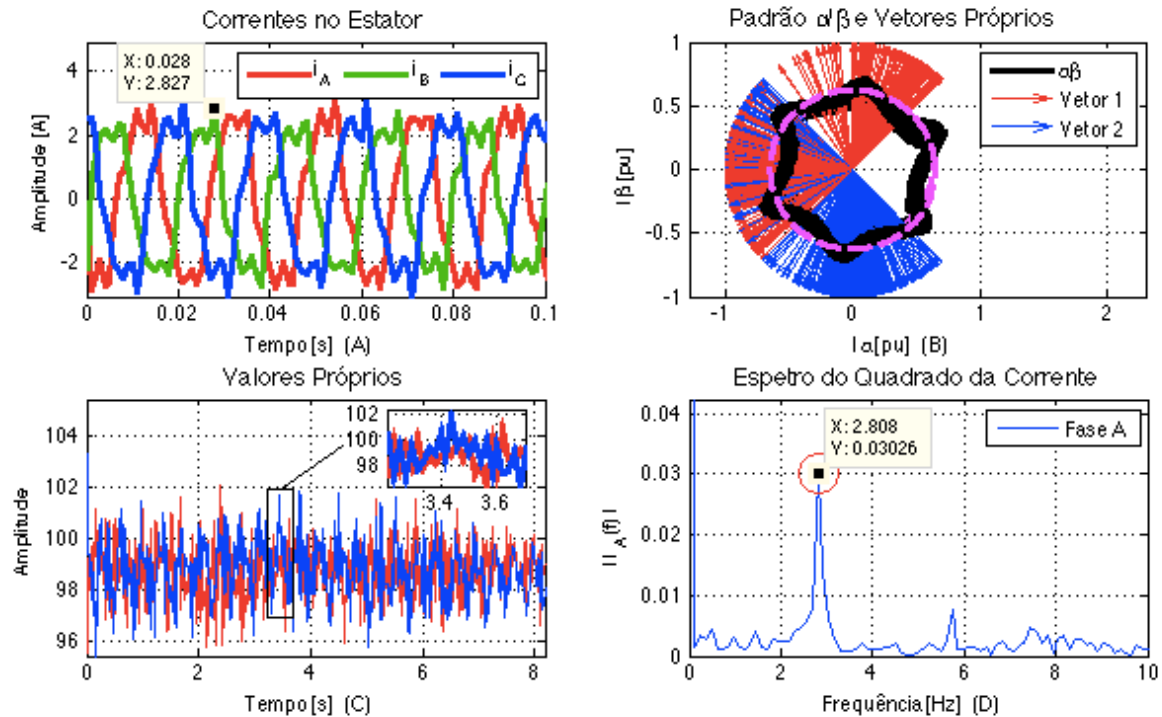


Figura 5.11 – Análise experimental do motor saudável, a 73% do regime nominal (A) correntes no estator, (B) padrão  $\alpha\beta$  e vetores próprios, (C) valores próprios e (D) espectro do quadrado da corrente.

Pela Figura 5.11-A constata-se que apesar de não terem sido provocadas falhas, este motor apresenta uma notável distorção harmónica devido à baixa qualidade de construção e dos materiais que o constituem, espectável por se tratar de um motor de baixo custo.

Dada a existência de harmónicas para além da fundamental, o padrão descrito pelo vetor de correntes  $\alpha\beta$  deixa de ser um círculo, como verificado na Figura 3.3 da análise teórica. Deste modo, e para facilitar a interpretação, é aplicado o método dos mínimos quadrados no sentido de aproximar este padrão a uma elipse ou um círculo, caso a excentricidade seja nula. O resultado desta aproximação é ilustrado através de uma linha rosa tracejada sobreposta ao padrão obtido, como mostra a Figura 5.11-B e acompanha as restantes figuras deste capítulo.

O resultado do diagnóstico obtido e fornecido ao utilizador, através do LCD da unidade TPU M220, é apresentado na tabela seguinte, tendo sido registada uma velocidade de 2918 RPM, medida através do transdutor ótico existente.



Tabela 5.2 – Diagnóstico do motor saudável, efetuado pela TPU M220.

IS Estator	Fase Defeituosa	IS Rotor	IS Barras Quebradas
0	0	5	0

A aproximação do padrão descrito pelo vetor de correntes  $\alpha\beta$ , através da linha rosa tracejada, descreve um círculo, característico dos motores sem falha(s) no estator. Embora a análise de componentes principais incida sob a forma representada a preto, semelhante a um hexágono, a disposição dos vetores próprios obtidos, e ilustrados na Figura 5.11-B, permite inferir a forma circular do padrão uma vez que não assumem uma direção preferencial. Deste modo, como expectável, foi apresentado no LCD da TPU M220 um índice de severidade nulo e a fase defeituosa assumiu o valor 0, como mostra a Tabela 5.2.

Relativamente ao rotor, foi obtido um índice de severidade relativamente baixo, que difere de zero uma vez que a amplitude do valor próprio principal apresenta uma variação, ainda que reduzida, ao longo do tempo. Este facto deve-se essencialmente às excentricidades existentes e que acompanham todos os motores, sendo mais acentuadas no caso de motores de baixo custo.

Apesar de não terem sido danificadas barras do rotor, o resultado da FFT do quadrado da corrente ilustrado na Figura 5.11-D, indica a presença das frequências características de barras quebradas, embora com baixa amplitude. Ainda que se verifiquem, o rácio entre a amplitude da frequência fundamental ( $k=1$ ) e a componente contínua fornece um correto diagnóstico das barras do rotor, uma vez que foi obtido um índice nulo, como mostra a Tabela 5.2. Este facto deve-se à má qualidade e dimensionamento das barras, que eventualmente não são equidistantes e/ou de secções idênticas [59].

Tendo sido aplicados os níveis de carga mencionados na Secção 5.3, através da TPU M220 foram obtidos os índices de severidade presentes na figura seguinte.

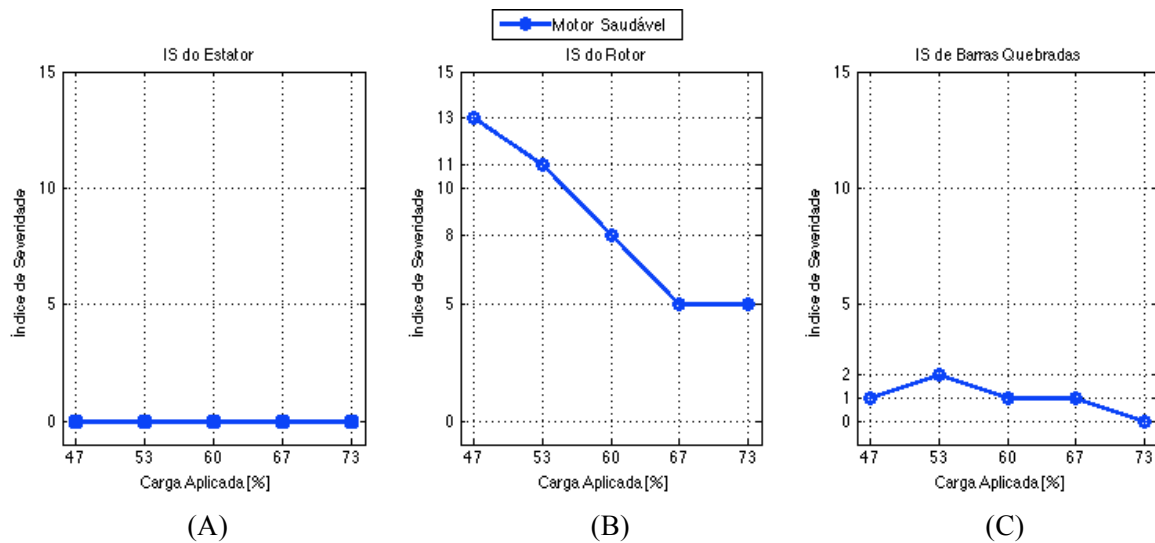


Figura 5.12 – Comportamento dos índices de severidade do (A) estator, (B) rotor e (C) barras quebradas do motor saudável, com a variação da carga aplicada.

Relativamente ao IS do estator, este indica corretamente a inexistência de falha(s) nos enrolamentos para os vários níveis de carga impostos.

A avaliação da condição do rotor, com base nos valores próprios principais, apresenta comportamento semelhante ao verificado na análise teórica (Secção 3.2.3). Verifica-se que o aumento da carga provoca uma redução acentuada dos índices, levando a concluir que o raio do *donut* descrito pelo vetor  $\alpha\beta$  varia com a carga aplicada, como será verificado mais à frente.

Por outro lado, o IS com base na FFT demonstra ser independente da carga aplicada ao motor, ainda que indique um valor diferente de zero, causado pelas razões mencionadas anteriormente, que advêm da qualidade do rotor.

Neste motor foi também comprovado o funcionamento do mecanismo de verificação de regime estacionário, detalhado na Secção 3.3. Este visa impedir um diagnóstico com base em amostras adquiridas durante alterações significativas do binário de carga aplicado.

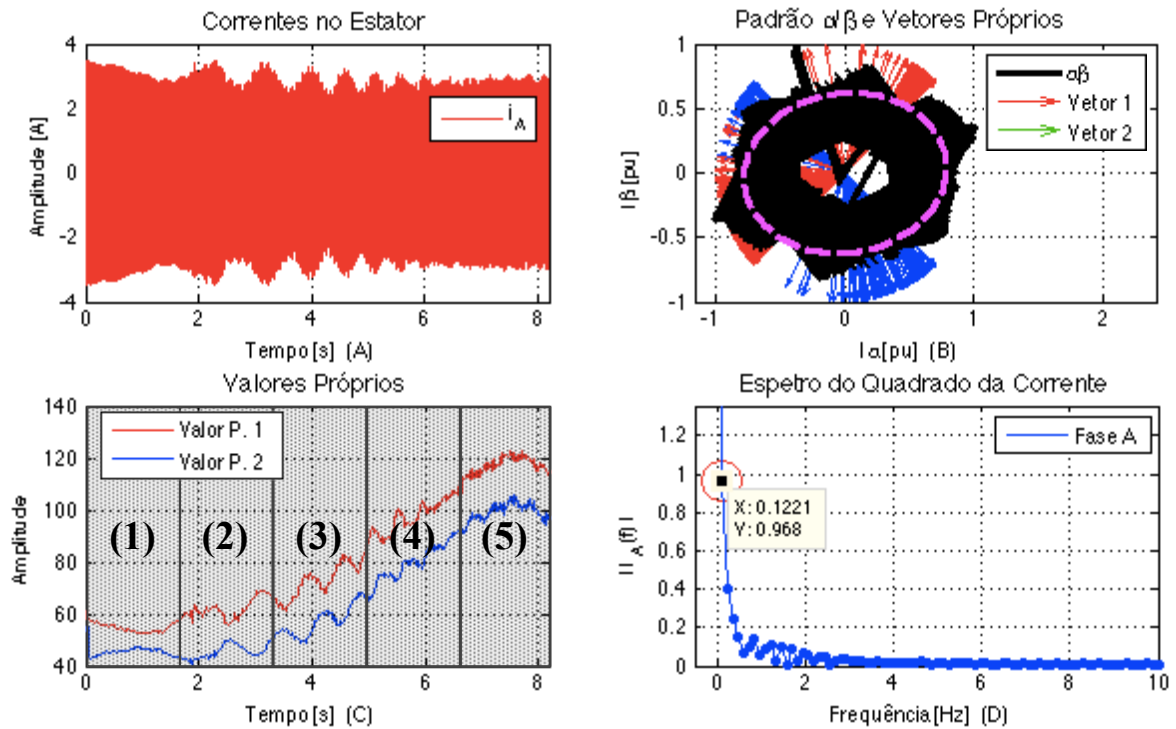


Figura 5.13 - Análise experimental do motor saudável, fazendo variar o binário aplicado (A) correntes no estator, (B) padrão  $\alpha\beta$  e vetores próprios, (C) valores próprios e (D) espectro do quadrado da corrente.

Não existindo o mecanismo desenvolvido, seria apresentado no LCD da unidade o diagnóstico de acordo com a tabela seguinte.

Tabela 5.3 - Diagnóstico do motor saudável com variação do binário, efetuado pela TPU M220.

IS Estator	Fase Defeituosa	IS Rotor	IS Barras Quebradas
0	0	19	6

Os valores apresentados permitem concluir que o diagnóstico, quando realizado a partir de dados não estacionários, efetua uma incorreta avaliação do estado do motor, visto que:

- **O IS do rotor quadruplicou**, uma vez que a espessura do *donut*, desenhado pelo padrão das correntes  $\alpha\beta$ , aumentou significativamente. Sendo o raio do padrão proporcional à amplitude das correntes de alimentação, uma vez que estas variam com a alteração do binário, é espectável o aumento da espessura ilustrada na Figura 5.13-B;
- **Passou a existir um IS de barras quebradas diferente de zero**, devido à distorção do espectro uma vez que a FFT é calculada a partir de um sinal não estacionário, tornando impossível a identificação da frequência característica de falha(s) nas barras do rotor. Deste

modo, a amplitude mais elevada no intervalo definido (0.12 a 10 Hz), passou de 0.03 para 0.97 Hz, conduzindo a um falso IS.

Os valores médios, obtidos pela TPU M220 a partir dos 5 intervalos de valores próprios principais, ilustrados na Figura 5.13-C, são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 5.4 – Valores médios dos valores próprios principais, por intervalo.

Intervalo	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Valor médio	54.8	61.7	72.3	96.7	116.8

Por último, é calculada a variância destes valores médios. Sendo esta igual a 664.5, as amostras adquiridas nestes ensaio são rejeitadas pois é ultrapassado o limite máximo de variância, definido como 0.5. Deste modo, o mecanismo desenvolvido assume extrema importância no sentido em que é garantido um diagnóstico a partir de sinais estacionários.

## 5.5. Motor com Falha no Estator

Como mencionado na Secção 5.2, a falha no estator foi provocada impondo duas resistências em série com duas fases do motor saudável, de modo a provocar um desequilíbrio.

Assim o motor saudável foi testado, tendo sido aumentada a resistência de duas fases passando de  $4\Omega$  para  $5.7\Omega$ ,  $10\Omega$ , e  $13.3\Omega$  na tentativa de simular curto-circuitos em, respetivamente, 30%, 60% e 70% das espiras dos enrolamentos, embora o ideal seria a construção de um mecanismo exterior que permitisse o curto-circuito destas. Contudo, no decorrer da dissertação, ainda que de forma abusiva, os ensaios são denominados por:

- ✓ Motor com 30% de falha no estator – 30% FE;
- ✓ Motor com 60% de falha no estator – 60% FE;
- ✓ Motor com 70% de falha no estator – 70% FE.

De seguida, são apresentados os resultados obtidos pela TPU M220, com base nas correntes de alimentação do motor, onde foi alterada a resistência da fase A e C para  $13.3\Omega$  (70% FE), tendo sido registada uma velocidade de 2790 RPM, ou seja, um escorregamento de 7%.

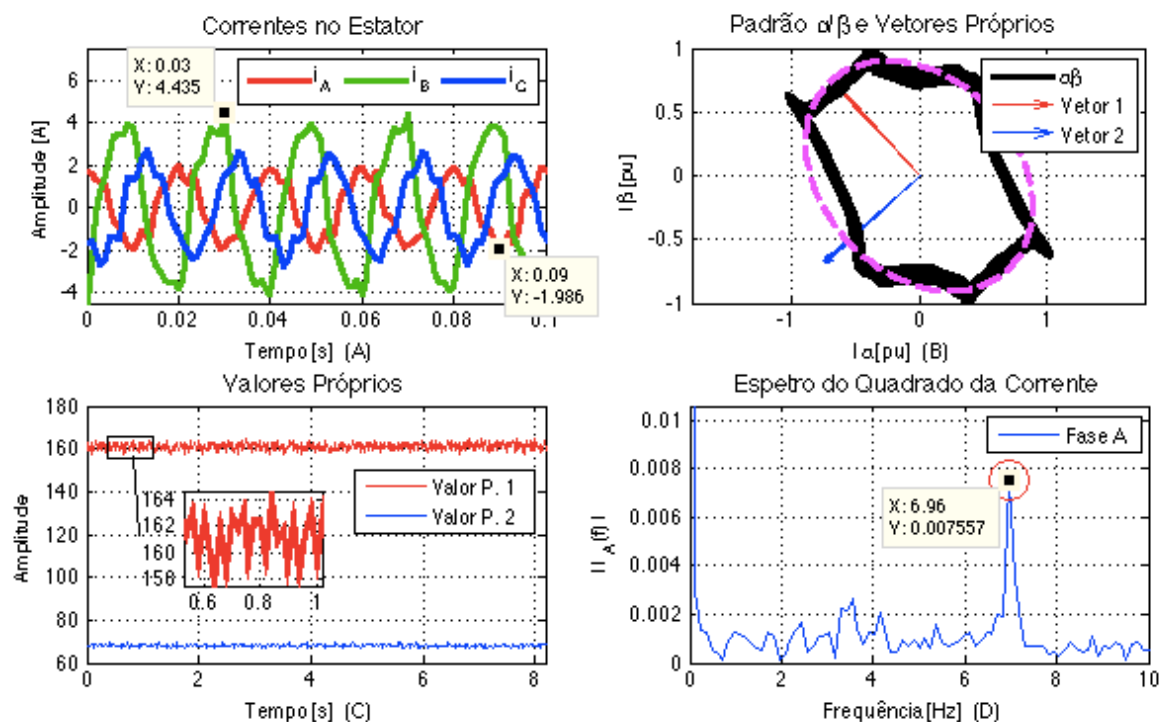


Figura 5.14 – Análise experimental do motor com 70% de FE, a 73% do regime nominal (A) correntes no estator, (B) padrão  $\alpha\beta$  e vetores próprios, (C) valores próprios e (D) espectro do quadrado da corrente.

Neste ensaio, a TPU apresentou no seu LCD a informação presente na tabela seguinte.

Tabela 5.5 – Diagnóstico do motor com 70% de FE, efetuado pela TPU M220.

IS Estator	Fase Defeituosa	IS Rotor	IS Barras Quebradas
58	2	4	0

Pela Figura 5.14-B verifica-se que os vetores próprios não mudam de quadrante, o que indica a existência de falha nos enrolamentos do estator, uma vez que assumem uma direção preferencial. Como referido na Secção 3.2.2., o quadrante onde o vetor principal está localizado indica a fase do enrolamento com falha. Estando no 2º quadrante, a fase defeituosa corresponde à ligada na segunda entrada analógica da TPU M220, conforme ilustrado na Figura 5.2. Este foi o resultado também apresentado no LCD sob a forma numérica, como indicado na Tabela 5.5.

Tendo sido alterada as duas fases onde estão ligadas resistências, foi obtida a figura seguinte.

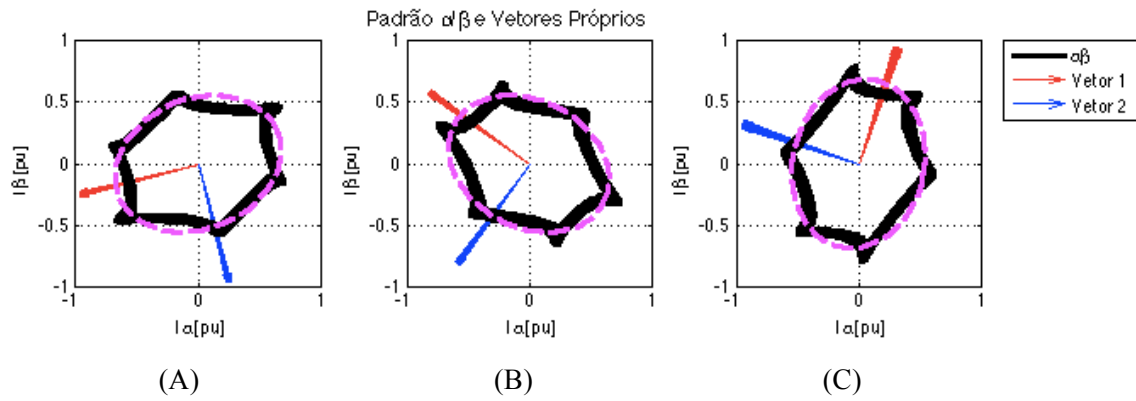


Figura 5.15 – Orientação dos vetores próprios conforme a falha afetada no caso de 60% FE, a 73% do regime nominal (A) fase A, (B) fase B e (C) fase C.

Nos três casos, foi efetuado um correto diagnóstico da fase afetada tendo sido identificada a fase defeituosa na TPU M220. Deste modo, o SSDF implementado, baseado na verificação do quadrante onde o vetor próprio principal está localizado, torna possível o diagnóstico da fase afetada e da gravidade com que esta se encontra.

Voltando à Tabela 5.5, verifica-se um elevado índice de severidade do estator, devido à distância entre o valor médio dos valores próprios (Figura 5.14-C). Esta distância, que equivale à diferença de amplitudes dos valores próprios, indica a excentricidade da elipse descrita pelo padrão  $\alpha\beta$ . Para realçar esta característica, verificada na análise teórica, de seguida é apresentada a evolução da excentricidade da elipse com a distância entre os valores próprios obtidos pela PCA, tendo sido alterada a gravidade da falha, ou seja, o valor das resistências variáveis em duas fases do motor.

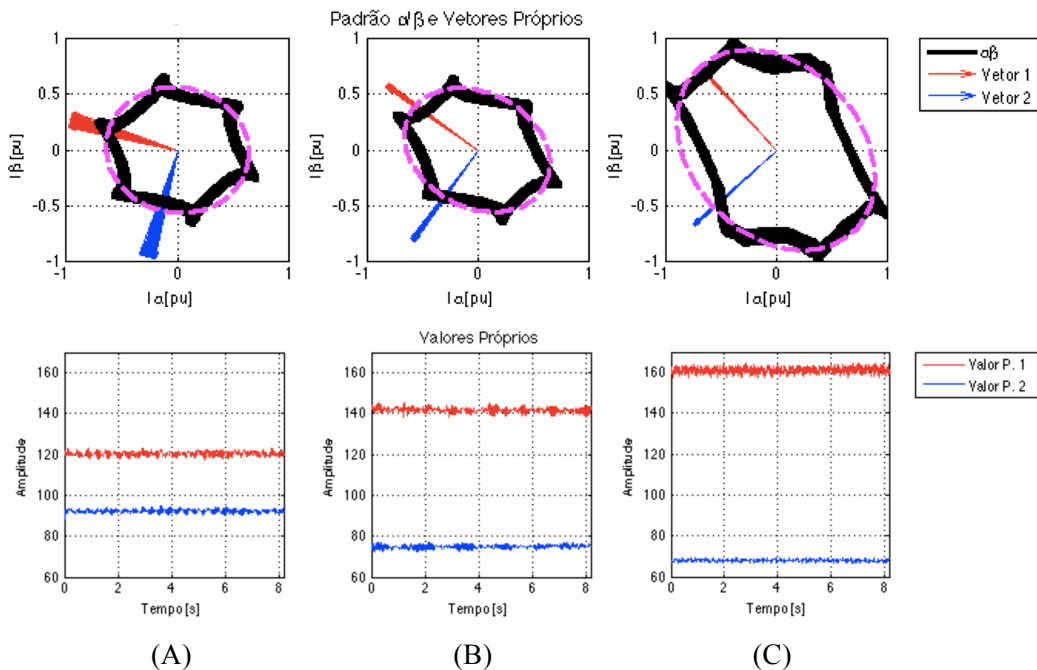


Figura 5.16 – Evolução da excentricidade e valores próprios em motor a 73% do regime nominal com (A) 30% FE (B) 60% FE (C) 70% FE.

A Figura 5.16 torna evidente que o aumento da gravidade da falha provoca o afastamento do valor médio dos valores próprios, que indicam o aumento da excentricidade, igualmente verificado.

Relativamente ao IS do rotor, este não sofreu alteração face ao motor sem falha. Do mesmo modo, o IS que avalia a existência de barras quebradas permaneceu nulo. Deste modo, o diagnóstico do rotor prova ser independente da condição do estator.

Foram recolhidos os índices de severidade que resultam do diagnóstico realizado pela TPU M220, do motor com 30%, 60% e 73% de falha no estator, tendo sido variado o binário de carga aplicado, dentro dos valores usuais. Com base nestes foi elaborada a figura seguinte, sendo que o motor com 73% de FE foi testado apenas para um nível de potência.

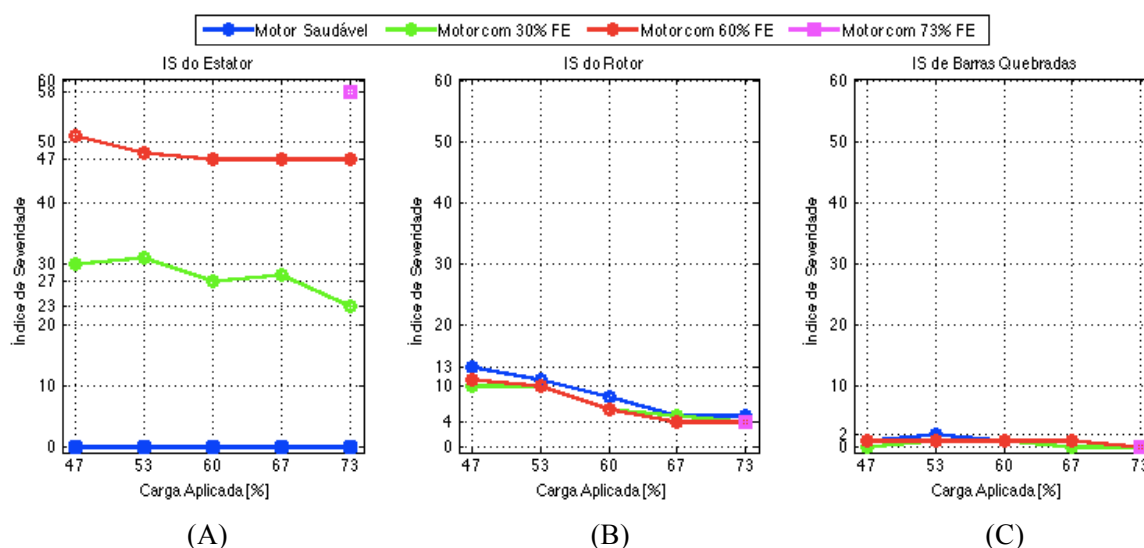


Figura 5.17 – Comportamento dos IS (A) do estator, (B) do rotor e (C) de barras quebradas, do motores com 30%, 60% e 73% de FE, fazendo variar a carga aplicada.

A Figura 5.17 demonstra que o SDDF implementado fornece um diagnóstico coerente com a condição do motor embora seja verificada uma variação, ainda que pouco acentuada, dos IS com o aumento da carga aplicada, igualmente observado nas simulações teóricas da Secção 3.2.2.

Fazendo uma análise dos índices para o nível de carga mais próximo do nominal (73%), constata-se que o aumento da gravidade da falha no estator é avaliada pelos respetivos índices de severidade, de forma praticamente proporcional à gravidade da falha provocada.

Relativamente ao IS do rotor, estes não sofreram alteração devido à falha no estator, coincidindo com os obtidos no motor saudável. O diagnóstico feito com base na FFT do quadrado da corrente continua a efetuar uma boa avaliação da condição das barras do rotor, com a vantagem de não sofrer variação com os diferentes níveis de carga aplicados.

## 5.6. Motor com Falha no Rotor

De modo a comprovar a eficácia do SDDF desenvolvido na detecção e diagnóstico de falhas, a nível das barras do rotor, foram feitos ensaios em motores com barras perfuradas artificialmente, como ilustrado na Figura 5.8. Deste modo, os ensaios recaem sobre:

- ✓ Motor com 2 barras do rotor quebradas – 2 BRQ;
- ✓ Motor com 9 barras do rotor quebradas – 9 BRQ;

Em regime estacionário, e aplicando o mesmo binário de carga (73% do nominal), foram obtidos da TPU M220 os dados representados na figura seguinte.

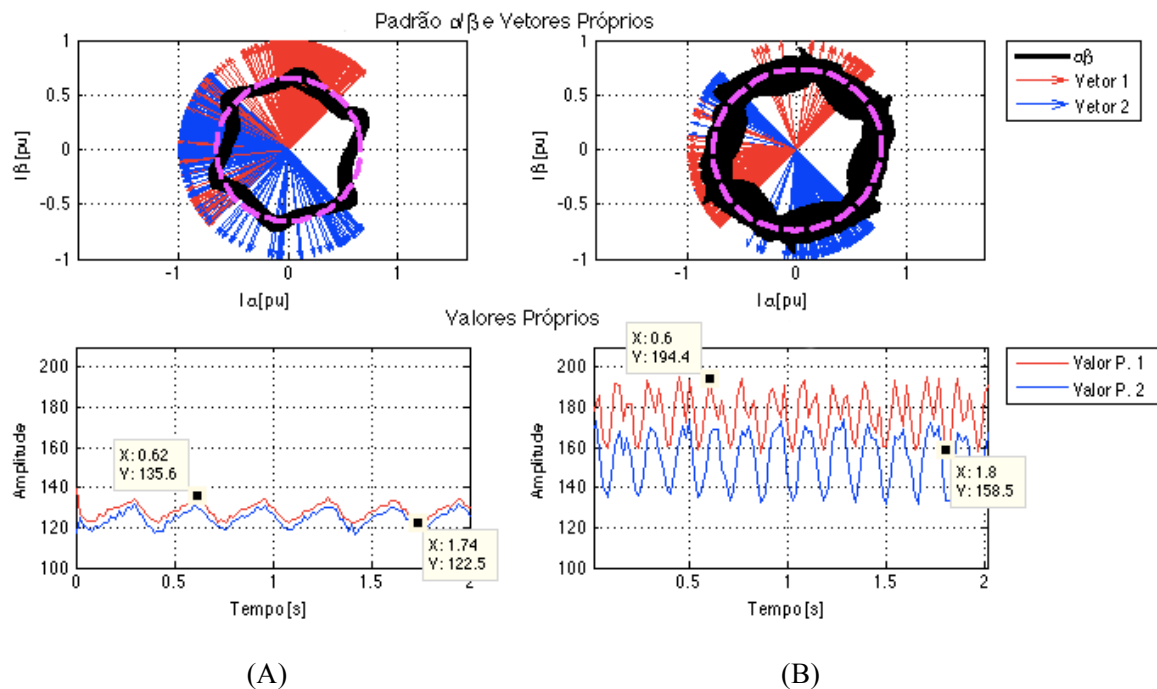


Figura 5.18 – Padrão  $\alpha\beta$ , vetores e valores próprios do motor com (A) 2 BRQ e (B) 9 BRQ, a 73% do regime nominal.

Nestes ensaios, no LCD da TPU M220 foi apresentado o diagnóstico de acordo com a tabela seguinte, tendo sido obtido pelo tradutor ótico, velocidades de 2910 e 2810 RPM, respetivamente aos motores com 2 BRQ e 9 BRQ.



Tabela 5.6 - Diagnóstico efetuado pela TPU M220, do motor com (A) 2 BRQ e (B) 9 BRQ.

(A)				(B)			
IS	Fase	IS	IS Barras	IS	Fase	IS	IS Barras
Estator	Defeituosa	Rotor	Quebradas	Estator	Defeituosa	Rotor	Quebradas
0	0	10	3	0	0	22	11

Relativamente ao estator, uma vez que os vetores próprios mudam de quadrante, durante o intervalo de amostragem, conforme observado na primeira linha da Figura 5.18, o sistema indica a inexistência de falha sendo o IS nulo. O facto do padrão  $\alpha\beta$  ser aproximado a um círculo reforça a ausência de falha a nível do estator, nos dois motores.

Na segunda linha da Figura 5.18 são ilustrados os valores próprios obtidos, tendo sido dispostos de forma a poder ser efetuada uma comparação. É notável que o aumento da gravidade da falha provoca um aumento da amplitude dos mesmos, uma vez que se regista uma evolução de 13.1 para 35.9, apresentando assim um comportamento não proporcional à gravidade da falha. Sendo os índices de severidade baseados nestas amplitudes, equação (3.10), é esperado que apresentem comportamento semelhante.

Pela Tabela 5.6, o IS do motor com 2 BRQ apresenta o valor 10, sendo espectável que evoluísse para 45 no caso de existirem 9 BRQ, o que não se verifica tendo sido obtido o valor 22. Assim, apesar de ser feita uma detecção da falha a nível do rotor, o diagnóstico não é coerente com a severidade da falha.

Como resultado da FFT, aplicada ao quadrado da corrente, implementada na TPU M220, foram obtidos os seguintes espetros, relativamente aos dois motores.

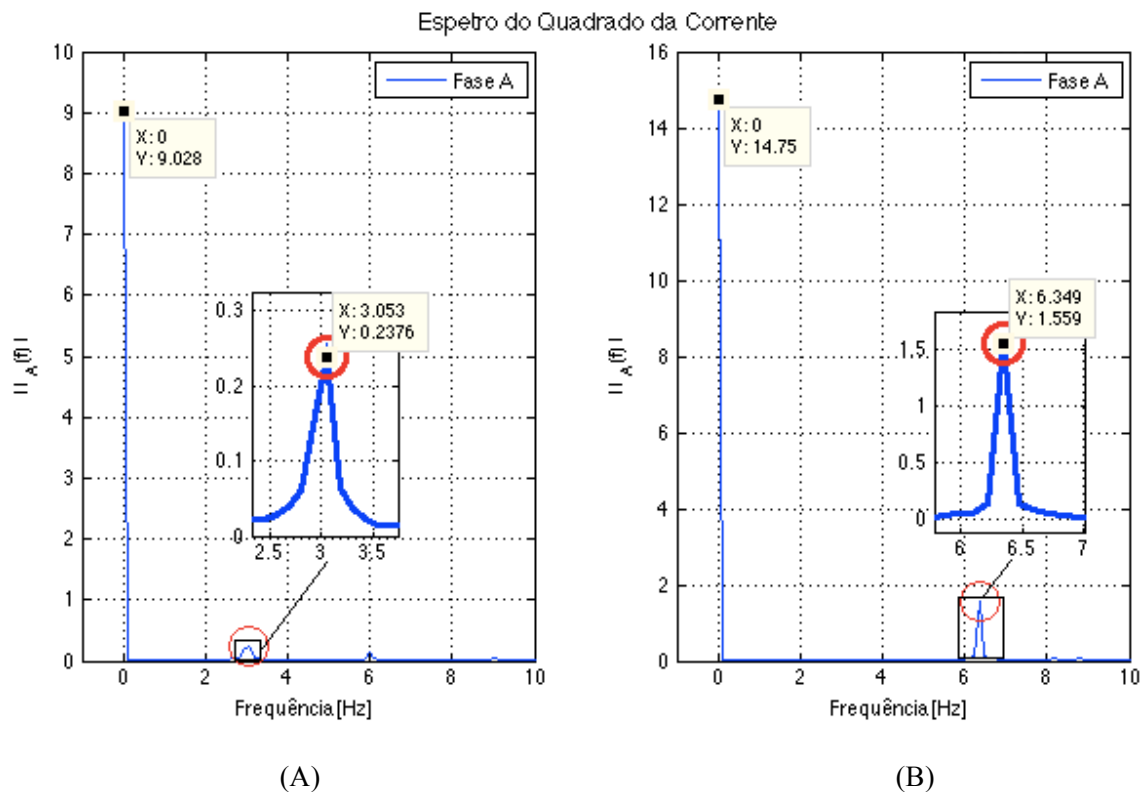


Figura 5.19 – Espectro do quadrado da corrente dos motores com (A) 2 BRQ (B) 9 BRBQ, a 73% do regime nominal.

Pela figura anterior verifica-se um aumento do rácio entre a frequência característica das barras quebradas e a da componente contínua. Sendo o índice de severidade calculado com base neste rácio, pela equação (3.14), este implicitamente aumenta com o número de barras danificadas.

Pela Tabela 5.6, foi obtido o valor 3 para o IS do motor com 2 BRQ e 11 para o motor com 9 BRQ, sendo esperado que este fosse igual a 13 de modo a existir uma relação proporcional. Embora se verifique uma ligeira discrepância em relação ao esperado, o diagnóstico efetuado por este método demonstra ser fiável na avaliação da condição das barras do rotor.

Os ensaios efetuados nestes dois motores foram repetidos fazendo variar a carga segundo os valores usuais, sendo que os índices de severidade resultantes são apresentados na figura seguinte.

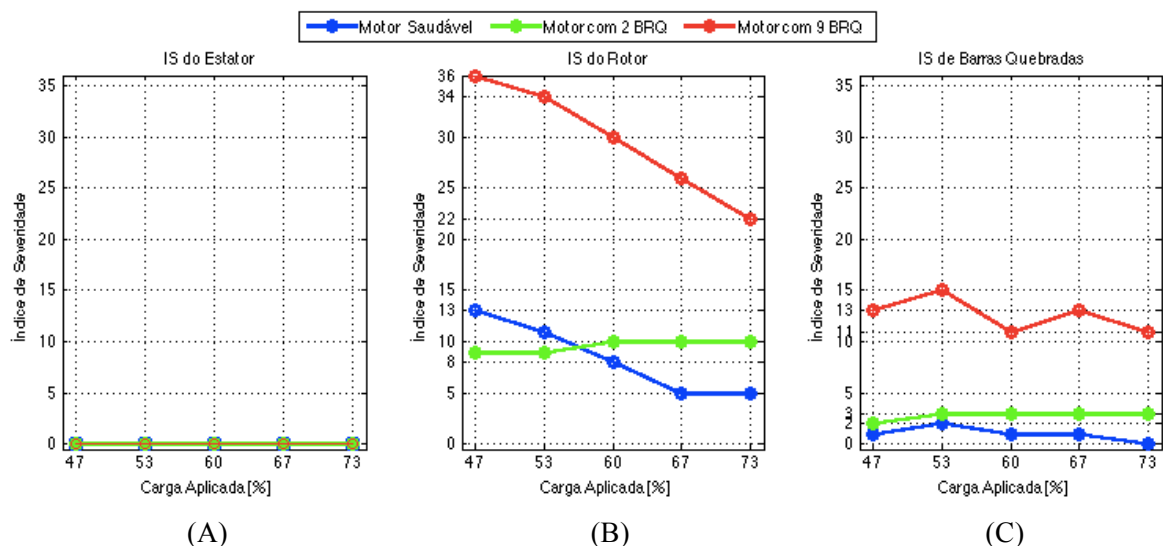


Figura 5.20 - Comportamento dos IS (A) do estator, (B) do rotor e (C) de barras quebradas, do motor saudável e dos motores com 2 BRQ e 9 BRQ, fazendo variar a carga aplicada.

Pela análise da Figura 5.20 consta-se que o SDDF desenvolvido fornece uma boa avaliação da condição do estator, uma vez que conclui a inexistência de falha mesmo com a variação do binário aplicado.

Relativamente ao rotor, o diagnóstico efetuado através da PCA demonstra ser fiável quando a severidade da falha é baixa, uma vez que os IS não variam. Quando a gravidade aumenta, como os IS variam com a carga, verifica-se uma avaliação não proporcional em relação aos obtidos no motor com 2 BRQ. De notar que a funcionar num regime abaixo de 50% face ao nominal, o motor com barras quebradas pode ser diagnosticado como saudável.

Por outro lado, os IS com base na FFT efetuam uma boa avaliação da condição das barras do rotor. O aumento do número de barras danificadas, provoca uma avaliação proporcional à gravidade da falha, que pouco varia com a alteração do binário.

## 5.7. Motor com Múltiplas Falhas

Embora inserido numa estratégia de manutenção que visa prever e impedir o agravamento de falhas, podem existir situações em que várias falhas afetam o normal funcionamento do motor.

Assim, o SDDF desenvolvido foi testado tendo sido combinadas falhas no estator e no rotor. Ao motor com 2 BRQ foram aplicadas as resistências de modo a provocar desequilíbrios nas fases, com o intuito de simular a existência de espiras curto-circuitadas. Deste ensaio foram obtidos os IS

presentes na figura seguinte, juntamente com os registados anteriormente nos motores com apenas uma falha.

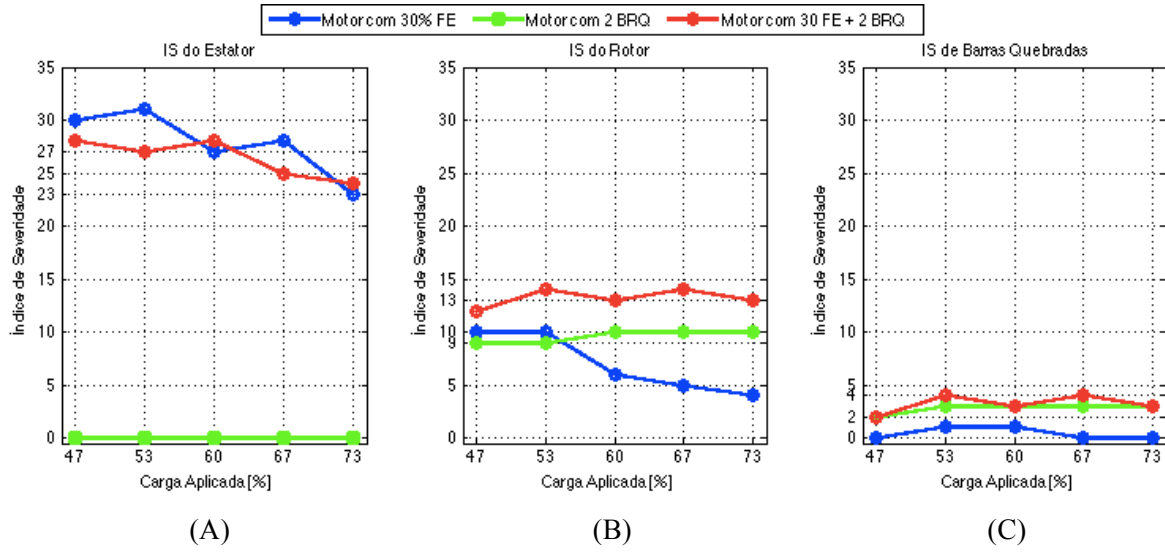


Figura 5.21 – Comportamento dos IS (A) do estator, (B) do rotor e (C) de barras quebradas, para os motores com 30% de FE, 2 BRQ e 30% FE em simultâneo com 2 BRQ, fazendo variar a carga aplicada.

A análise da Figura 5.21 permite concluir que a existência de múltiplas falhas não acrescenta perturbação significativa no diagnóstico, sendo semelhante ao obtido nos motores com apenas uma falha. Com estes resultados, o SDDF demonstra que a avaliação individual dos componentes do motor é pouco influenciada pela existência de várias falhas em simultâneo.

## 5.8. Motor com Excentricidades

Como referido na Secção 5.2, de modo a aumentar o nível de excentricidade existente no entreferro, foi introduzido no veio dos motores um disco com pesos distribuídos na sua periferia. Este procedimento visa fazer variar a força centrífuga que atua no rotor, de modo ser possível identificar estas frequências através da TPU M220.

Na existência de excentricidade(s), tal como na presença de barras quebradas, no espetro das corrente de alimentação são identificáveis frequências características deste tipo de falha por [68], [103],

$$f_{EXC} = f \pm k \cdot f_R \quad (4.2)$$

que segundo o método do quadrado das correntes passam a ser dadas por,

$$f_{EXC_{quadrado}} = k \cdot f_R \quad (4.3)$$

e,

$$f_{EXC_{quadrado}} = 2 \cdot f \pm k \cdot f_R \quad (4.4)$$

sendo  $f$  a frequência da rede,  $f_R$  a de rotação do motor e  $k = 1, 2, 3, \dots$ .

Assim, do motor com o disco acoplado no veio, foi obtido pela TPU M220 o seguinte espectro do quadrado das correntes de alimentação, tendo sido registada uma velocidade de 2923 RPM, aplicando um binário de carga de modo a colocar o motor a 67% do seu regime nominal.

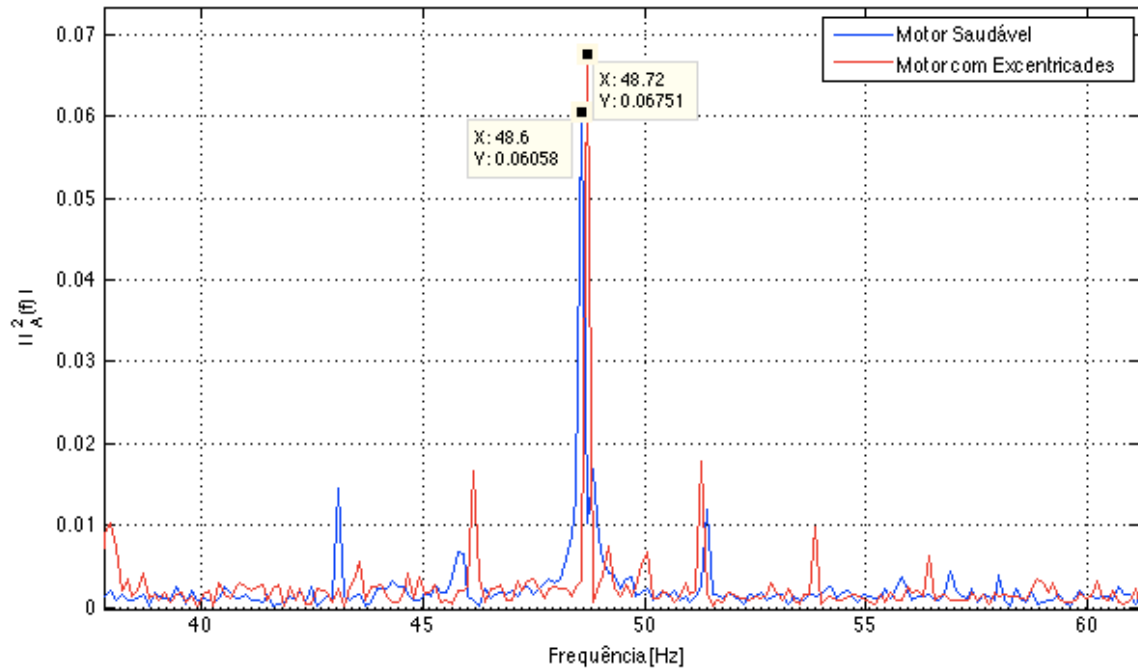


Figura 5.22 – Espectro do quadrado das correntes do (A) motor saudável e do (B) motor com disco acoplado.

As frequências observadas vão de acordo com as velocidade de 2920 RPM registados em ambos os ensaios. Uma vez que não houve alteração significativa da amplitude, conclui-se que o disco não produziu o efeito para o qual foi projetado.

Dado que o ensaio demonstrou ser perigoso devido às acentuadas vibrações provocadas, responsáveis pelo movimento do suporte dos motores pelo chão do laboratório, e não tendo sido registados os resultados desejados, este tipo de análise é proposto para trabalho futuro.

Para ser viável e seguro, será necessário um apoio fixo onde os motores possam ser ensaiados sem existir movimento, possibilitando também a inclusão de um maior número de pesos no disco.



## 6. Conclusões e Trabalho Futuro

Na indústria podem ser adotadas várias estratégias de manutenção que vão desde as mais extremas, onde não existe qualquer tipo de verificação do equipamento, até manutenções feitas de forma preditiva. Sendo que a avaria dos motores elétricos representa a maior causa (30%) das suspensões inesperadas de instalações industriais, causadoras de pesados prejuízos económicos, é de extrema importância adotar um plano de manutenção nestes.

Dada a forte evolução dos processadores digitais de sinais, têm vindo a ser adotadas avançadas estratégias de manutenção dos equipamentos, no sentido de existir uma contínua monitorização da condição destes. Contudo, este tipo de manutenção apresenta custos significativos dada a necessidade de acoplar um conjunto significativo de sensores, sendo a informação, muitas vezes, obtida por técnicas invasivas, obrigando ao ensaio do motor em bancada. Por outro lado, requerem que um técnico especializado valide e analise os dados, para que seja concluído acerca da condição do motor. Tudo isto torna o processo economicamente pouco atrativo.

Nesta dissertação é desenvolvido um sistema de deteção e diagnóstico de falhas em motores de indução que procura efetuar um diagnóstico de forma automática, autónoma e em tempo real, sem acréscimo do investimento, minimizando os custos típicos deste tipo de manutenção. Visto que este sistema tem a particularidade de necessitar apenas das correntes de alimentação para efetuar o diagnóstico, pode ser incorporado em sistemas de proteção digitais (e.g. relés) que acompanham geralmente os motores e possuem, por defeito, transformadores de corrente. Deste modo, aliada à proteção dos motores, a manutenção passa a dispor de um sistema de diagnóstico sem os custos adicionais. Para detetar e diagnosticar falhas, este sistema recorre a uma análise de componentes principais (PCA), juntamente com uma análise espectral das correntes de alimentação.

Na ausência de falhas, o padrão desenhado pelo vetor de correntes  $\alpha\beta$ , obtido pela transformada de Concordia aplicada às correntes trifásicas, descreve um círculo. Uma falha nos enrolamentos do estator transforma esta forma numa elipse, pois passa a existir um sistema trifásico desequilibrado. A excentricidade desta elipse está relacionada com a severidade da falha e a sua orientação, com a fase elétrica afetada.

Na existência de excentricidades e/ou barras quebradas em motores com rotor em gaiola de esquilo, ou curto-circuito nas espiras dos enrolamentos, para rotores bobinados, o padrão circular passa a descrever um *donut*, cujo raio interior depende da gravidade da falha. Esta forma deve-se à

oscilação periódica existente nas amplitudes das correntes de alimentação, que se reflete nas correntes  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  equivalentes.

A análise PCA permitiu identificar estes padrões através dos valores e vetores próprios, resultantes da sua aplicação à matriz correlação, das correntes bifásicas  $\alpha\beta$ . Uma vez que a análise incide sob duas variáveis, são obtidos dois vetores ortogonais e dois valores próprios correspondentes. O vetor com maior valor próprio, o principal, indica a direção onde este conjunto apresenta maior correlação, e o segundo, a menor. Por outro lado, estes valores representam o comprimento do maior/menor semieixo de uma elipse orientada segundo o vetor principal, ou o raio de um círculo, no caso de serem iguais.

Em resultado, no caso dos valores próprios serem idênticos significa que o padrão desenhado pelo vetor de correntes  $\alpha\beta$  representa um círculo, ou seja, o motor não tem falha(s). Numa situação em que estes são diferentes, indica um padrão em forma de elipse, cujo eixo maior encontra-se orientado segundo o vetor próprio principal. Dependendo da fase afetada, este eixo pode assumir direções em três quadrantes distintos, permitindo assim, identificar a fase do enrolamento com falha(s). Por último, no caso de serem obtidos valores próprios idênticos com um comportamento sinusoidal ao longo do tempo, é inferida a forma de donut característica de danos a nível dos enrolamentos ou das barras que constituem o rotor.

A análise espectral foi utilizada no sentido de identificar as frequências, que caracterizam a existência de danos a nível das barras dos rotores em gaiola de esquilo. Esta falha provoca perturbações no espectro das correntes elétricas, introduzindo frequências difíceis de identificar dada a proximidade com a fundamental. De modo a tornar possível a sua identificação, é analisado o espectro não das correntes, mas do quadrado do valor destas. Este método, semelhante ao da potência instantânea, fornece informação adicional uma vez que as frequências desta falha deslocam-se para uma zona afastada da frequência da rede. Por outro lado, a amplitude destas é independente da inércia do motor, das harmónicas da tensão de alimentação e da variação da carga aplicada, possibilitando assim avaliar a gravidade da falha nas barras. Uma vez que esta análise tem de ser feita a partir de dados estacionários, foi criado um mecanismo para garantir a análise de sinais transitórios, onde as correntes obtidas durante alterações na carga, são rejeitadas.

Deste modo, o sistema, através dos valores/vetores próprios e do valor da amplitude da frequência mencionada, efetua um diagnóstico da(s) falha(s), que é apresentado no LCD da unidade onde foi implementado, por um conjunto de índices de severidade relativos ao estator, rotor e às barras que o constituem. Esta unidade, TPU M220, produzida pela empresa EFACEC, permite de igual modo estabelecer alarmes visuais, através de LEDs existentes no painel frontal, que foram configurados de modo a acender quando os índices excedem um valor previamente definido.



A fiabilidade destes índices foi verificada através de um modelo matemático que permite simular a ocorrência de falha(s), tendo sido comprovada laboratorialmente em motores de baixa potência, onde artificialmente, foram provocadas falhas.

A análise PCA permitiu detetar corretamente a existência de curto-circuitos nas espiras dos enrolamentos. Na existência de falha, foi identificada e apresentada corretamente a fase afetada, através da identificação do quadrante onde os vetores próprios principais estão localizados. Os índices de severidade relativos ao estator, obtidos através do modelo teórico e dos ensaios experimentais, com base nos valores próprios, embora de forma ligeiramente desproporcional em relação à gravidade, forneceram um bom diagnóstico dos enrolamentos. Foi verificado que estes índices diminuem acentuadamente com o aumento do binário de carga aplicado ao motor.

Relativamente às falhas no rotor, de modo a abranger os dois tipos de rotor existentes, o sistema desenvolvido foi testado para um motor com rotor bobinado, através do modelo matemático, e para um motor com rotor em gaiola de esquilo, através de ensaios laboratoriais.

Os índices obtidos por simulação indicaram um correto diagnóstico, tendo assumido valores proporcionais à gravidade da falha provocada, ou seja, à percentagem imposta de espiras do rotor curto-circuitadas. Estes demonstraram também ser pouco dependentes do binário aplicado ao motor. Relativamente ao ensaio experimental, os índices não demonstraram ser proporcionais ao número de barras quebradas, tendo sido verificado que diminuem acentuadamente com o aumento do binário. Admite-se que esta discrepância face aos simulados se deva à má qualidade de construção dos motores, que apresentam grande distorção harmónica. Esta distorção faz com que o *donut* não seja circular, induzindo num diagnóstico de menor fiabilidade uma vez que é calculado com base no seu raio interior.

A análise PCA demonstrou capacidade na avaliação das falhas existentes de forma independente, dado que foram efetuados ensaios em motores com múltiplas falhas e os resultados não foram alterados significativamente, em relação aos obtidos na presença de apenas uma falha.

O último método, a análise espectral, demonstrou resultados bastante satisfatórios, uma vez que em todos os ensaios foram obtidos índices de severidade proporcionais à gravidade da falha e com uma insignificante variação com o aumento do binário.

Assim, a principal conclusão é de que este sistema mostra ser capaz de identificar a existência de desequilíbrios nos enrolamentos do estator, sendo que em todos os ensaios, foi identificada a fase defeituosa. O diagnóstico desta falha, embora tendo sido demonstrado não ser diretamente proporcional à severidade da falha, fornece uma noção qualitativa da condição dos enrolamentos.

Relativamente às falhas no rotor, o diagnóstico feito pela análise PCA, apresentou resultados bastante satisfatórios uma vez que reflete corretamente a gravidade da falha provocada, sendo

pouco afetada pela carga aplicada ao motor. Pelos resultados experimentais foi verificado que o índice de severidade obtido é bastante influenciado pela qualidade do motor. Por outro lado, o diagnóstico das barras do rotor, efetuado a partir do espectro, apresentou resultados independentes da carga e da qualidade do motor, e que descrevem corretamente a condição destas.

Como trabalho futuro sugere-se a repetição dos ensaios em motores com melhor qualidade, para confirmar se a discrepância nos diagnósticos dos ensaios teóricos da falha no rotor resulta, essencialmente, da baixa qualidade de construção. Por outro lado, a investigação nesta área seria enriquecida com o ensaio melhorado do disco perfurado, que se mostrou inconclusivo, pois permitirá melhorar a capacidade de deteção de excentricidades.

## Bibliografia

- [1] W. T. Thomson and M. Fenger, “Current signature analysis to detect induction motor faults,” *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, 2001.
- [2] I. Ahmed, R. Supangat, and J. Grieger, “A baseline study for on-line condition monitoring of induction machines,” apresentado na Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)., Brisbane, Australia, 2004.
- [3] C. J. Verucchi and G. G. Acosta, “A review on fault diagnosis of induction machines,” *Latin American Applied Research*, vol. 38, pp. 113–121, 2008.
- [4] M. El Hachemi Benbouzid, “A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, 2000.
- [5] L. Wang and R. X. Gao, *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*. Springer, 2006.
- [6] I. Rodriguez, R. Alves, and V. Guzman, “Analysis of Air Gap Flux to Detect Induction Motor Faults,” apresentado na Universities Power Engineering Conference (UPEC)., Newcastle, UK, vol. 2, pp. 690–694, 2006.
- [7] G. K. Singh and A. S. Al Kazzaz, “Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research—a survey,” *Electric Power Systems Research*, vol. 64, no. 2, pp. 145–158, 2003.
- [8] P. Tavner, *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. IET, 2008.
- [9] M. A. C. Marques, “Sistema on-line de detecção de avarias em motores de indução baseado em PCA,” Dissertação de Mestrado, Dept. Eng. Eletro., Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, 2012.
- [10] E. L. Bonaldi, L. E. de L. de Oliveira, J. G. B. da Silva, G. Lambert-Torres, and L. E. B. da Silva, “Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors,” *InTech*, vol. 20, pp. 487–520, 2012.
- [11] V. DEAC, G. Cârstea, C. Bâgu, and F. Pârvu, “The Modern Approach to Industrial Maintenance Management,” *Informatica Economică*, vol. 14, no. 2, 2010.
- [12] T. Lindh, “On the condition monitoring of induction machines,” Dissertação de Doutorado, Dept. Eng. Eletro., Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Suécia, 2003.
- [13] *Refining Services Inc. - FCC Reliability*. [Online]. Disponível em: <http://www.refiningservicesinc.com/reliability.html>. [Consultado a: 20-Set-2013].

- [14] K. Wang, *Intelligent Condition Monitoring and Diagnosis Systems - A Computational Intelligence Approach*. IOS Press, 2003.
- [15] B. K. N. Rao, *Handbook of Condition Monitoring*. Elsevier, 1996.
- [16] I. Tsoumas, E. Mitronikas, G. Georgoulas, and A. Safacas, "A comparative study of induction motor current signature analysis techniques for mechanical faults detection," apresentado na Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)., pp. 1–6, Viena, Áustria, 2005.
- [17] G. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines*. Wiley-IEEE Press, 2004.
- [18] M. L. Sin, W. L. Soong, and N. Ertugrul, "Induction machine on-line condition monitoring and fault diagnosis-A survey," apresentado na Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Christchurch, Nova Zelândia, 2003.
- [19] "Cahier technique no. 207," Schneider Electric, Out. 2004.
- [20] T. Kikuchi and T. Kenjo, "A unique desk-top electrical machinery laboratory for the mechatronics age," *IEEE Trans. Edu.*, vol. 40, no. 4, 1997.
- [21] A. E. A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery*. McGraw-Hill Companies, 2003.
- [22] B. S. Guru and H. R. Hiziroglu, *Electric machinery and transformers*. Oxford University Press, USA, 2001.
- [23] "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations - Parts I, II and III," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, no. 4, pp. 853–864, 1985.
- [24] E. P. Cornell, E. L. Owen, and J. C. Appiarius, "Improved motors for utility applications - volume 1," *EPRI*, 1982.
- [25] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 28, no. 4, pp. 921–937, 1992.
- [26] T. A. Lipo, *Introduction to AC Machine Design*. 2007.
- [27] G. Stone and J. Kapler, "Stator winding monitoring," *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 4, no. 5, pp. 15–20, 1998.
- [28] M. A. Cash, "Detection of Turn Faults Arising from Insulation Failure in the Stator Windings of AC Machines," Dissertação de Doutorado, Dept. Eng. Eletro., University of Wisconsin, Wisconsin, USA, 1998.
- [29] S. Bin Lee, R. M. Tallam, and T. G. Habetler, "A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 865–872, 2003.
- [30] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. A. Capolino, "Advances in Diagnostic

- Techniques for Induction Machines,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4109–4126, 2008.
- [31] *Interpretation de Fallas en Motores Electricos - Appendice 17*. [Online]. Disponível em: <http://www.ing.unlp.edu.ar/sisipot/Libros%202007/libros/cme/vol-08/2ape17/cm-a17.htm>. [Consultado a: 18-Set-2013].
- [32] *SKF - Ball Bearings*. [Online]. Disponível em: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/product-tables-ball/index.html>. [Consultado a: 20-Set-2013].
- [33] T. A. Harris, *Rolling Bearing Analysis*. John Wiley & Sons Inc, 1967.
- [34] J. Riddle, *Ball Bearing Maintenance*. University of Oklahoma Press, Oklahoma, USA, 1955.
- [35] I. Y. Onel and M. E. H. Benbouzid, “Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study,” apresentado na Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)., vol. 2, pp. 1073–1078, Antalya, Turquia, 2007.
- [36] *Cu Inc - Cooper Rotors Help Meet Unusual Requirements*. [Online]. Disponível em: <http://www.copper.org/environment/sustainable-energy/electric-motors/motor-rotor/update/2007/01/index.html>. [Consultado a: 20-Jul-2013].
- [37] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford University Press on Demand, 1993.
- [38] *Hefei Wanhua Electrical Machinery Tech Development Co., Ltd - Patent Technology of Breakage Prevention Rotor Bar*. [Online]. Disponível em: <http://www.hfwhdj.com/en/display.asp?id=569>. [Consultado a: 20-Set-2013].
- [39] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, S. Bin Lee, and D. Hyun, “Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, pp. 1673–1683, 2011.
- [40] X. Li, Q. Wu, and S. Nandi, “Performance Analysis of a Three-Phase Induction Machine With Inclined Static Eccentricity,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 2, pp. 531–541, 2007.
- [41] U. Werner, “FE-analysis of a soft-mounted two-pole induction motor regarding relative shaft vibrations caused by static rotor eccentricity,” apresentado na Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)., pp. 1448–1455, Sorrento, Itália, 2012.
- [42] J. Faiz and B. M. Ebrahimi, “Mixed Fault Diagnosis in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor Using Analysis of Air-Gap Magnetic Field,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 64, EMW Publishing, pp. 239–255, 2006.

- [43] D. GUO, F. CHU, and D. Chen, "THE UNBALANCED MAGNETIC PULL AND ITS EFFECTS ON VIBRATION IN A THREE-PHASE GENERATOR WITH ECCENTRIC ROTOR," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 254, no. 2, pp. 297–312, Jul. 2002.
- [44] A. NEGOIȚĂ, G. SCUTARU, and R. M. IONESCU, "A BRIEF REVIEW OF MONITORING TECHNIQUES FOR ROTATING ELECTRICAL MACHINES," *Bulletin of the Transilvania University of Braşov• Vol*, vol. 3, p. 52, 2010.
- [45] H. Hafezi and A. Jalilian, "Design and Construction of Induction Motor Thermal Monitoring System," apresentado na Universities Power Engineering Conference (UPEC)., vol. 2, pp. 674–678, Newcastle, UK, 2006.
- [46] P. Zhang, Bin Lu, and T. G. Habetler, "Active stator winding thermal protection for AC motors," apresentado na Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC)., pp. 11–19, Birmingham, UK, 2009.
- [47] M. O. Sonnaillon, G. Bisheimer, C. De Angelo, and G. O. Garcia, "Online Sensorless Induction Motor Temperature Monitoring," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 2, pp. 273–280, 2010.
- [48] *An intro to infrared thermography for mechanical applications*. [Online]. Disponível em: <http://www.reliableplant.com/Read/20181/infrared-thermography-mechanical>. [Consultado a: 15-Set-2013].
- [49] Sang-Bin Lee, T. G. Habetler, R. G. Harley, and D. J. Gritter, "An evaluation of model-based stator resistance estimation for induction motor stator winding temperature monitoring," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 17, no. 1, pp. 7–15, Mar. 2002.
- [50] R. Beguenane and M. E. H. Benbouzid, "Induction motors thermal monitoring by means of rotor resistance identification," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 3, pp. 566–570, 1999.
- [51] S. B. Lee and T. G. Habetler, "An on-line stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines," apresentado na Industry Applications Conference Thirty-Sixth IAS Annual Meeting., vol. 3, pp. 1564–1571, Chicago, USA, 2001.
- [52] O. Duque, M. Perez, and D. Morinigo, "Detection of Bearing Faults in Cage Induction Motors Fed by Frequency Converter using Spectral Analysis of Line Current," apresentado na Electric Machines and Drives IEEE International Conference, pp. 17–22, San Antonio, USA, 2005.
- [53] R. A. Collacott, *Vibration Monitoring and Diagnosis*. 1979.
- [54] R. R. Obaid, T. G. Habetler, and J. R. Stack, "Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors," apresentado na Diagnostics for Electric Machines,

- Power Electronics and Drives (SDEMPED)., Atlanta, USA, pp. 182–187, 2003.
- [55] G. B. Kliman and J. Stein, “Methods of Motor Current Signature Analysis,” *Electric Machines and Power Systems*, vol. 20, no. 5, pp. 463–474, Feb. 2007.
  - [56] N. Mehala and R. Dahiya, “Motor current signature analysis and its applications in induction motor fault diagnosis,” *International journal of systems applications, engineering & development*, vol. 2, no. 1, pp. 29–35, 2007.
  - [57] D. Foito, P. Silva, T. Barbosa, J. Maia, V. F. Pires, and J. F. Martins, “New real coordinates model for an asymmetrical six-phase induction machine,” apresentado na International Aegean Conference on Electric Machines and Power Electronics & Electromotion (ACEMP)., pp. 514–519, Istanbul, Turquia, 2011.
  - [58] J. Vico, I. Voloh, D. Stankovic, and Z. Zhang, “Enhanced algorithm for motor rotor broken bar detection,” apresentado na Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)., pp. 1–8, Tallahassee, USA, 2010.
  - [59] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, and H. Razik, “A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 2, pp. 1127–1142, 2007.
  - [60] M. R. Mehrjou, N. Mariun, M. H. Marhaban, and N. Mison, “Evaluation of Fourier and wavelet analysis for efficient recognition of broken rotor bar in squirrel-cage induction machine,” apresentado na International Conference on Power and Energy (PECon)., pp. 740–743, Kuala Lumpur, Malásia, 2010.
  - [61] W. T. Thomson, “On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure,” apresentado na Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)., pp. 891–898, Cambridge, UK, 2001.
  - [62] N. Mehala, “Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Motors,” *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, 2011.
  - [63] M. Arkan, D. K. Perovic, and P. Unsworth, “Online stator fault diagnosis in induction motors,” *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 148, no. 6, pp. 537–547, 2001.
  - [64] G. B. Kliman, W. J. Premerlani, R. A. Koegl, and D. Hoeweler, “A new approach to on-line turn fault detection in AC motors,” apresentado na Industry Applications Conference, Thirty-First IAS Annual Meeting (IAS)., vol. 1, pp. 687–693, San Diego, USA, 1996.
  - [65] S. M. Cruz and A. M. Cardoso, “Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach,” *Electric Machines and Power Systems*, 2000.
  - [66] A. M. Cardoso and S. M. Cruz, Eds., “Diagnosis of the multiple induction motor faults

- using Extended Park's Vector Approach,” *International Journal of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, vol. 4, pp. 19–25, 2001.
- [67] M. A. Cash and T. G. Habetler, “Insulation failure detection in the stator windings of ASD-driven induction machines using standard deviation of line currents,” apresentado na Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting., vol. 1, pp. 299–303, St. Louis, USA, 1998.
- [68] Z. Liu, X. Yin, Z. Zhang, D. Chen, and W. Chen, “Online Rotor Mixed Fault Diagnosis Way Based on Spectrum Analysis of Instantaneous Power in Squirrel Cage Induction Motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 3, pp. 485–490, Set-2004.
- [69] H. Çalış and A. Çakır, “Rotor bar fault diagnosis in three phase induction motors by monitoring fluctuations of motor current zero crossing instants,” *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 5, pp. 385–392, Abr. 2007.
- [70] S. F. Legowski, A. H. M. Sadrul Ula, and A. M. Trzynadlowski, “Instantaneous power as a medium for the signature analysis of induction motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 4, pp. 904–909, 1996.
- [71] V. Kokko, “Condition Monitoring of Squirrel-cage Motors by Axial Magnetic Flux Measurements,” Dissertação de Doutorado, Dept. Eng. Eletro., University of Oulu, Oulu, Finlândia, 2003.
- [72] J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd, and W. T. Fink, “Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 4, pp. 652–658, 1994.
- [73] S. M. Tetrault, G. C. Stone, and H. G. Sedding, “Monitoring partial discharges on 4-kV motor windings,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 3, pp. 682–688, 1999.
- [74] G. C. Stone, H. G. Sedding, and M. J. Costello, “Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 2, pp. 459–464, 1996.
- [75] G. Betta, C. Liguori, A. Paolillo, and A. Pietrosanto, “A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 6, pp. 1316–1322, 2002.
- [76] *Portable Vibration Spectrum Analyzer*. [Online]. Disponível em: [http://www.altera.com/literature/dc/2.8-2005\\_China\\_3rd\\_InstitutePLA-web.pdf](http://www.altera.com/literature/dc/2.8-2005_China_3rd_InstitutePLA-web.pdf). [Consultado a: 17-Set-2013].
- [77] *SKF Microlog Analyzer AX*. [Online]. Disponível em: <http://www.skf.com/us/industry-solutions/material-handling/solutions-by-industry/container-terminals/maintenance-optimization/skf-microlog-analyzer-ax.html>. [Consultado a: 17-Set-2013].
- [78] R. S. Kumar, S. S. Kumar, R. Saravanakumar, A. I. Selvakumar, K. Reddy, and J. M.



- Varghese, “Condition Monitoring of DSP Based Online Induction Motor External Fault Detection Using TMS320LF2407 DSP,” apresentado na Process Automation, Control and Computing (PACC)., pp. 1–5, Coimbatore, India, 2011.
- [79] J.-H. Jung, L. Jong-Jae, and B.-H. Kwon, “Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, IEEE, pp. 1842–1852, 2006.
- [80] “Timken Online Intelligence System,” *INTELIGENTE*. [Online]. Disponível em: [http://www.timken.com/en-us/products/maintdiag/reliability/products/Documents/Online%20Intelligence%20System/10295\\_OIS%20Overview%20Broch\\_Final\\_June09.pdf](http://www.timken.com/en-us/products/maintdiag/reliability/products/Documents/Online%20Intelligence%20System/10295_OIS%20Overview%20Broch_Final_June09.pdf). [Consultado a: 16-Set-2013].
- [81] *Preditor - Sistema de Manutenção Preditiva para Motores Elétricos*. [Online]. Disponível em: <http://www.pssolucoes.com.br/downloads/folder-preditor-rev05.pdf>. [Consultado a: 17-Set-2013].
- [82] S. Bakhri, N. Ertugrul, W. L. Soong, and S. Al-Sarawi, “Investigation and development of a real-time on-site condition monitoring system for induction motors,” apresentado na Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)., pp. 1–6, Perth, Australia, 2007.
- [83] *Texas Instruments - CompactRIO*. [Online]. Disponível em: <http://www.ni.com/compactrio/whatis/pt/>. [Consultado a: 15-Set-2013].
- [84] K. Pearson, *On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space*. 1901.
- [85] H. Hotelling, *Analysis of a complex of statistical variables into principal components*. 1933.
- [86] S. J. Qin, “Statistical process monitoring: basics and beyond,” *Journal of Chemometrics*, 2003.
- [87] S. J. Qin, “Data-driven fault detection and diagnosis for complex industrial processes,” apresentado na 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Espanha, 2009.
- [88] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. N. Kavuri, and K. Yin, “A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods,” *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 327–346, 2003.
- [89] J. E. Jackson, “A user's guide to principal components,” vol. 587, 2005.
- [90] I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*. Springer, 2002.
- [91] L. H. Chiang, R. D. Braatz, and E. L. Russell, *Fault detection and diagnosis in industrial systems*. Springer, 2001.
- [92] R. H. Park, “Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I,” *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. 48, no. 3, pp. 716–727, Jul. 1929.

- [93] V. F. Pires, J. F. Martins, and A. J. Pires, "Eigenvector/eigenvalue analysis of a 3D current referential fault detection and diagnosis of an induction motor," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 5, pp. 901–907, Mai 2010.
- [94] A. Roskovic, R. Grbic, and D. Sliskovic, "Fault tolerant system in a process measurement system based on the PCA method," apresentado na MIPRO, Proceedings of the 34th International Convention., pp. 1646–1651, Opatija, Croácia, 2011.
- [95] J. C. Davis, *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, 1973.
- [96] T. G. Amaral, V. F. Pires, J. F. Martins, A. J. Pires, and M. M. Crisostomo, "Statistic Moment Based Method for the Detection and Diagnosis of Induction Motor Stator Fault," apresentado na Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)., pp. 106–110, Setúbal, Portugal, 2007.
- [97] J. F. Martins, V. F. Pires, and A. J. Pires, "PCA-Based On-Line Diagnosis of Induction Motor Stator Fault Feed by PWM Inverter," apresentado na Industrial Electronics IEEE International Symposium, vol. 3, pp. 2401–2405, Montreal, Canadá, 2006.
- [98] Bin Lu and M. Paghda, "Induction motor rotor fault diagnosis using wavelet analysis of one-cycle average power," apresentado na Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)., pp. 1113–1118, Austin, USA, 2008.
- [99] I. Jaksch and P. Fuchs, "Rotor cage faults detection in induction motors by Motor Current Demodulation Analysis," apresentado na Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)., pp. 247–252, Cracóvia, Polónia, 2007.
- [100] E. H. El Bouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, and J. F. Charpentier, "Induction machine bearing failures detection using stator current frequency spectral subtraction," apresentado na Industrial Electronics (ISIE)., pp. 1228–1233, Hangzhou, China, 2012.
- [101] J. F. Martins, V. F. Pires, and T. Amaral, "Induction motor fault detection and diagnosis using a current state space pattern recognition," *Pattern Recognition Letters*, vol. 32, no. 2, pp. 321–328, 2011.
- [102] C. T. Kowalski and W. Kanior, "Effectiveness of the frequency analysis of the stator current in the rotor fault detection of induction motors," apresentado na Industrial Technology (ICIT)., pp. 1–5, Chengdu, China, 2008.
- [103] V. F. Pires, M. Kadivonga, J. F. Martins, and A. J. Pires, "Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis," *Measurement*, vol. 46, no. 2, pp. 942–948, Out. 2012.
- [104] *EFACEC TPU S220*. [Online]. Disponível em: [http://www.efacec.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/Catalogos%202012/Automa%C3%A7%C3%A3o/as92i1011c1\\_TPU220\\_EN.pdf](http://www.efacec.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/Catalogos%202012/Automa%C3%A7%C3%A3o/as92i1011c1_TPU220_EN.pdf). [Consultado a: 19-Set-2013].

- [105] D. Reay, *Digital Signal Processing and Applications with the OMAP - L138 EXperimenter*. John Wiley & Sons, 2012.



```
% Fault Detection and Diagnosis in Three-Phase Induction Motors, using PCA and
FFT os the square phase current
% Copyright (c) Andre Aguas.
% All rigths reserved.
% Distributions are not allowed to source code or binary forms, with or without
modifications.
% THIS IS UNPUBLISHED PROPRIETARY SOURCE CODE OF Andre Aguas.
```

97

```

end

%% Per Unit System %%
for j=1:maxSamples,
    iAlpha_plot(j)= iAlpha_array(j)/pu;
    iBeta_plot(j)= iBeta_array(j)/pu;
end

%% Load Variation Check %%
num_interv = 5;
interv = length(eigen1_array)/num_interv;
j=1;k=1;
for j=1:interv:length(eigen1_array),
    vMed(k)=mean(eigen1_array(j:interv+j-1));
    k=k+1;
end

%% Best Interval for Diagnosis %%
minVarPos = find(vMed==min(vMed));
int1 = (minVarPos-1)*interv;
int2 = minVarPos*interv;
if (minVarPos==1)
    int1=1;
    int2=minVarPos*interv+1;
end

if (var(vMed)<0.5) %If stationary currents
    %% FFT square current %%
    NFFT = 2^nextpow2(maxSamples);
    Ya_quad = fft(sig.iA.^2,NFFT)/maxSamples;
    f = Fa/2*linspace(0,1,NFFT/2);

    %% Find Broken Rotor Bar Frequency %%
    res = Fa/(NFFT);
    int = round((slip*2)/res);
    pos1 = 0;
    max1 = 0;
    for i = 2 : 1 : int,
        if (max1<abs(Ya_quad(i))),
            max1=abs(Ya_quad(i));
            pos1=i;
        end
    end

    %% Stator Diagnosis %%
    phase_A=0; phase_B=0; phase_C=0; fault=0;
    for i=int1:int2, %Check Principal Eigenvector Quadrant Orientation
        if (eigenVector1x(i)<0 & eigenVector1y(i)<0); phase_A = phase_A+1;
        end
        if (eigenVector1x(i)<0 & eigenVector1y(i)>0); phase_B = phase_B+1;
        end
        if (eigenVector1x(i)>0 & eigenVector1y(i)>0); phase_C = phase_C+1;
        end
    end
    if (phase_A == interv+1) fault=1; end
    if (phase_B == interv+1) fault=2; end
    if (phase_C == interv+1) fault=3; end
    if (fault~=0)

```

```

        SI_stator = round(100*(1-
            mean(eigen2_array(int1:int2))/mean(eigen1_array(int1:int2))));
        fprintf('\nFaulty Phase = %d\n', fault);
        fprintf('Stator Severity Index = %d\n\n', SI_stator);
    else
        fprintf('\nHealthy Stator!\n\n');
    end;

%% Rotor Diagnosis %%
SI_rotor = round(100*((max(eigen1_array(int1:int2))-
    min(eigen1_array(int1:int2)))/max(eigen1_array(int1:int2))));
fprintf('Rotor Severity Index = %d\n\n', SI_rotor);

SI_FFT = round(100*abs(Ya_quad(pos1))/abs(Ya_quad(1)));
fprintf('Broken Rotor Bars Severity Index = %d\n\n', SI_FFT);

%% PLOTS %%
figure();
%% Stator Currents
subplot(2,2,1);
plot(t,sig.iA,'-r'); hold all; plot(t,sig.iB,'-g'); plot(t,sig.iC,'-b');
%%%%%
title('Stator Currents'); legend('i_A','i_B','i_C');
xlabel('Time [s]'); ylabel('Amplitude [A]'); xlim([0 5*t_periodo]);
grid on;

%% Tranf. Alpha/Beta
t2 = 0:0.001:2*pi;
x = cos(t2);
y = sin(t2);
subplot(2,2,2);
plot(x,y,'--k'); hold all
for i=1:length(eigenVector1x), % Eigen Vectors
    a=quiver(0,0,eigenVector1x(i),eigenVector1y(i),1,'r','LineWidth',1);
    b=quiver(0,0,eigenVector2x(i),eigenVector2y(i),1,'b','LineWidth',1);
    i=i+1;
end
c=plot(iAlpha_plot,iBeta_plot,'k','LineWidth',2);
%%%%%
title('\alpha\beta Pattern'); legend([c a b],'\alpha\beta','Vector
1','Vector 2')
xlabel('I\alpha [pu]'); ylabel('I\beta [pu]'); axis equal; grid on;

%% Eigen Values
subplot(2,2,3);
plot(tEigen(1:end-1),eigen1_array(1:end-1),'.-r'); hold all;
plot(tEigen(1:end-1),eigen2_array(1:end-1),'.-b');
%%%%%
title('Eigen Values'); legend('Eigen 1','Eigen 2');
xlabel('Time [s]'); ylabel('Amplitude'); grid on; xlim([0 max(tEigen)]);

%% Square Current Spectrum
subplot(2,2,4);
plot(f,2*abs(Ya_quad(1:NFFT/2)),'-b'); hold all;
plot(f(pos1),2*abs(Ya_quad(pos1)),'ro','MarkerSize',15);
%%%%%
title('Square Current Spectrum'); legend('Phase A','Max. Amplitude');
xlabel('Frequency [Hz]'); ylabel('|I_A^2(f)|'); grid on; xlim([0

```

```
2*slip]); ylim([0 2.8*abs(Ya_quad(pos1))]);  
else  
    fprintf('Load Variaton Detected!\n')  
end
```



